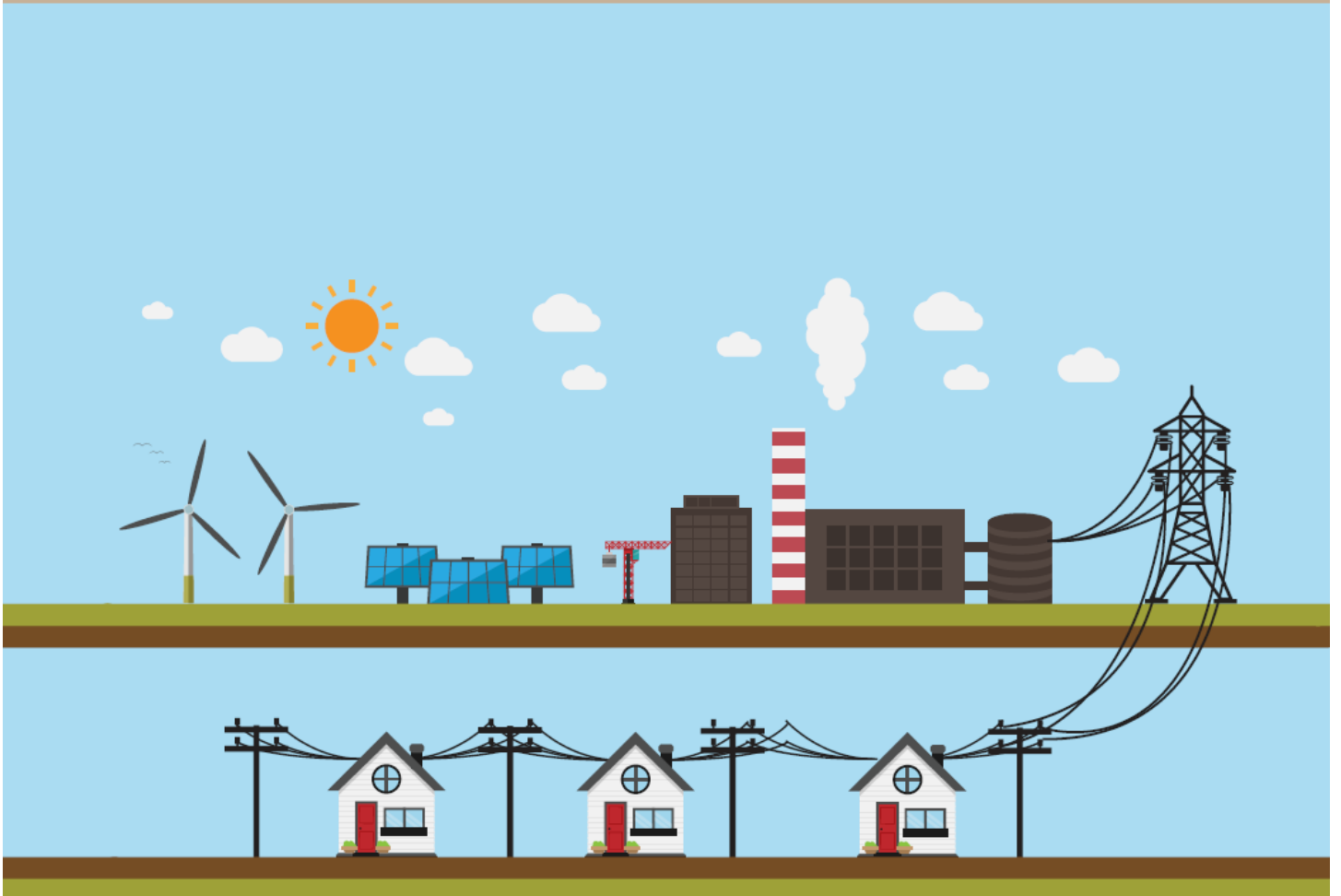


هندسة القوى الكهربائية

دراسات في توليد و نقل و توزيع الطاقة الكهربائية



أ. د. محمود جيلاني
كلية الهندسة – جامعة القاهرة

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

هندسة القوى الكهربائية

دراسات في توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية

أ.د. محمود جيلاني

الأستاذ بكلية الهندسة - جامعة القاهرة

drgilany@gmail.com

الطبعة الأولى 2016

وقف لله تعالى

الملقِّنة

هذا الكتاب هو محاولة لسد الفجوة بين الجانب الأكاديمي الذي يغلب على الكتب الجامعية ، وبين الواقع العملي الذي يعيشه المهندس بعد التخرج ، وقد كتبته لأفهم ما صعب على فهمه أو تخيله من مواضيع القوى الكهربائية حين كنت طالبا ، أو حتى بعد تخرجي ، وربما هذا ما يفسر لك نوعية الموضوعات التي درست في فصول هذا الكتاب ، فهي لا تتشابه مع الكتب التقليدية في هذا المجال ، فلست أهدف إلى مجرد جمع معلومات عن كل موضوع ، وإنما كان لي أثناء كتابة أى موضوع هدفان أساسيان:

1- الهدف الأول هو توضيح الرؤية الشاملة المختصرة للموضوع أولا ، وأحيانا يكون توضيح الرؤية باختصار أصعب من كتابة الموضوع نفسه. وأشار هنا مثلا إلى مقدمة الباب الرابع في هذا الكتاب وهو خاص بشبكات التوزيع الكهربائية ، فمقدمة هذا الباب لا تتعدى بضع صفحات لكنى كتبته في عدة أسابيع ، وقد حاولت فيها أن ألخص المهام والمفاهيم والدراسات التي يجب أن يلم بها أى مهندس يعمل في مجال "شبكات التوزيع" في منظومة القوى الكهربائية ، ومثلها مقدمة الباب الثالث التي حاولت فيها أن ألخص ماذا يعنى تصميم محطة محولات فرعية "Substation" ، وما هي الخلفيات العلمية التي يحتاجها المهندس الذي يعمل في هذه المجالات.

2- الهدف الثانى ، وهو يتعلق بالتفاصيل ، وكان هدفى فيها أن أربط الجانب النظرى بالواقع العملي ، سواء من خلال عرض مشاكل حقيقية من المواقع والمحطات ، أو من خلال العديد من البيانات والصور الواقعية ، أو من خلال نقل الخبرة العملية للقارئ عند الحديث عن بعض الجزئيات ، حتى يعيش القارئ الجو الواقعى لما هو مكتوب.

لغة الكتاب

وحاولت في سبيل تحقيق تلك الأهداف استخدام لغة عربية سلسة ، وأسلوب هندسى منظم في العرض ، ومن هنا كان عنوان الكتاب : "هندسة القوى الكهربائية" . وأشار هنا إلى ما قاله العلامة ابن خلدون مؤسس علم الاجتماع في وصف معنى أن تكون مهندسا:

... "و اعلم أن الهندسة تفيد صاحبها إضاءة في عقله ، واستقامة في فكره ؛ لأن براهينها كلها بينة الانتظام ، جليلة الترتيب ، لا يكاد الغلط يدخل أقيستها لترتيبها وانتظامها ، فيبعد الفكر بممارستها عن الخطأ ، وينشأ لصاحبها عقل منتظم ، وقد زعموا أنه كان مكتوبا على باب أفلاطون: من لم يكن مهندسا فلا يدخلن منزلا ، وكان شيوخنا رحمهم الله يقولون: ممارسة الهندسة للفكر بمثابة الصابون للثوب الذي يغسل منه الأقدار و ينقيه من الأوزار والأدران، و إنما ذلك لما أشرنا إليه من ترتيبه وانتظامه".

ومن هنا كان هذا الكتاب محاولة عربية من أجل "هندسة" القوى الكهربائية .

ما هي منظومة القوى الكهربائية ؟

تتكون هذه المنظومة من ثلاثة منظومات أساسية وهي:

1- **منظومة توليد القدرة الكهربائية (Generation System)** وهي المنظومة التي تشتمل عند دراستها على عدة موضوعات من أهمها : الشبكات الموحدة ، والتحكم في القدرة المولدة ، و أنواع المحطات ، واقتصاديات التوليد.

2- **منظومة نقل القدرة الكهربائية (Transmission System)** وهذه المنظومة تنقسم إلى قسمين: الشبكات الهوائية **Overhead Transmission System** ، والكابلات الأرضية **Underground Cables** . والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بموضوعات من قبيل دراسة أنواع الموصلات وأنواع العوازل وأعطال الكابلات واختباراتها واكتشاف أماكنها ، وحسابات القدرة الفعالة المنقولة ، وكذلك دراسة القدرة غير الفعالة **Reactive Power** وعلاقتها بتغير وثبات الجهد في الشبكات ، إلى آخر ذلك من موضوعات.

3- **منظومة توزيع القدرة الكهربائية (Distribution System)** وتختص هذه المنظومة بنقل الطاقة إلى المستهلكين من خلال شبكة الجهد المتوسط وأيضاً شبكة الجهد المنخفض. والدارس لهذا الموضوع يجب عليه أن يلم بموضوعات كثيرة متعلقة بتخطيط شبكات التوزيع ومكونات شبكة التوزيع ، وأنظمة التوزيع والتحكم المختلفة إلخ.

وينظم عمل هذه المنظومات الثلاثة مجموعة من المنظومات الفرعية مثل منظومة الحماية ، ومنظومة التحكم ، ومنظومة القياس ، ومنظومة الاتصالات.

وتعتبر **محطات التحويل Substations** بمثابة مفاصل الربط الأساسية بين المنظومات الثلاثة الرئيسية ، حيث تتواجد بداخل محطات التحويل جميع المنظومات المساعدة السابقة (الحماية - القياس - الاتصالات - التحكم).

وبالتبع فكل المنظومات تتعاون معا للوصول إلى جودة الخدمة المطلوبة ، مع التحقق من استقرار الشبكة (**Power System Stability**) ، والتي يقصد بها مدى قدرة الشبكة على سرعة استعادة القيم الطبيعية للتشغيل (سواء للتردد أو للجهد) بعد حدوث هزات عابرة بالشبكة **Transients** سواء كانت هذه الهزات بسيطة أو هزات ضخمة.

وهذا الكتاب مكون من ستة أبواب ، تغطي كثيرا من الموضوعات الهامة التي يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربائية. وقد أشرت لعناوين هذه الأبواب الستة ضمن المقدمة السابقة وذلك بخط ثقيل نسبيا ، علما بأن المنظومات الفرعية سيتم الحديث عنها أيضا ضمن أبواب الكتاب.

لن هذا الكتاب؟

هذا الكتاب كتب أساساً لمهندسي الكهرباء بصفة عامة ، وكذلك لطلاب أقسام الكهرباء سواء في الجامعة أو ما يعادله من التعليم التطبيقي والفنى . ولذا فأنا أفترض أن المصطلحات الكهربائية الأساسية معروفة للقارئ ، ولا تحتاج لشرح ، كما أفترض أن كثيرا من هذه المصطلحات معروفة باللغة الإنجليزية أيضا .

ونظراً لأهمية الموضوع فقد روعي في أسلوب كتابته أن يكون بعيداً عن أى تعقيدات رياضية من غير إخلال بعمق الدراسة ، كما أن كتابته باللغة العربية جعلته أيضاً مناسباً لقطاع عريض من الفنيين المتخصصين الباحثين عن فهم أساسيات ما يقومون به من أعمال فنية دون معوق من لغة أو تعقيد في الشرح.

ماذا ينقص هذا الكتاب؟

هذا الكتاب ربما يكون الأول باللغة العربية فى تنوع مجالاته ، وكبر حجمه (حوالى 800 صفحة) ، وسهولة أسلوبه فى تناول الموضوعات ، والمزج بين الجانب الأكاديمي والجانب العملى فى الشرح . ومع ذلك فليس كل أحد سيجد فيه غايته الكاملة .

- فالطالب سيجد أن الأمثلة المحلولة فيه قليلة. (ويمكن تعويض ذلك بالرجوع إلى الكتب التى تشتهر بكثرة الأمثلة المحلولة وخاصة الكتب الهندية ، وقد أخذت بعض الأمثلة المحلولة فى بعض الفصول "نسخاً" من كتاب V.K. Mehta ويمكن الرجوع إليه للمزيد ، ويمكن أيضا الرجوع لكتاب Theraja ، وهما من أفضل الكتب التى تقدم أمثلة محلولة تفيد الطالب) .
- و المهندس فى المحطات سيجد أن الكتاب ينقصه التفاصيل العملية للتشغيل ، وشرح مراحل التحكم فى المعدات بالتفصيل ، إلخ. (ويمكن استكمال ذلك بالرجوع للكتالوجات أو إلى ملفات موجودة على منتديات القوى الكهربائية تشرح هذه الأمور ، وتعالج هذه النقطة).
- والأستاذ الجامعي سيجد الكتاب ينقصه إثباتات تفصيلية للمعادلات الرياضية المستخدمة فى الشرح حتى يمكن للطالب معرفة الأساس الرياضى لبعض القضايا مثل دراسات ال Transients الواردة فى الباب الأخير ، ومثل حسابات استنتاج ال TL Parameters فى الباب الثانى مثلاً. والحق أن تعمدت ذلك ، لأن أغلب المراجع تستخدم هذا الأسلوب فى الشرح ، ولن أقدم جديداً إذا سرت على نفس المنوال ، فاخترت أن استخدم المعادلة فى صورتها النهائية ولا أتبع طريقة استنتاجها ، وفضلت بعد ذلك أن أهتم بشرح Physical Meaning للموضوع ، وبهذه الطريقة فى تحليل وفهم المشاكل يمكن فهم الأساسيات دون معوق من إثباتات لمعادلات رياضية تستهلك جهداً كبيراً فى فهمها ثم لا تقدم فائدة مباشرة سوى للأكاديميين والباحثين. وعموماً يمكن استكمال هذا الجانب بالرجوع للمراجع التى تهتم بهذا الجانب مثل الموجودة فى قائمة المراجع الأجنبية فى نهاية الكتاب .
- و الطلاب من بعض الدول العربية سيجدون بعض المشاكل فى عدم استخدام اللغة العربية فى كافة المواضع ، وسيجدون أنى أعتمد على المصطلح الإنجليزي كثيراً بدلاً من ترجمته. وهذه المشكلة قد يعانى

منها بالفعل بعض القراء . لكنى وجدت أن شيوع المصطلحات الإنجليزية جعلت معظم العاملين في المجال يفضلون التعامل بالمصطلح الانجليزي ، و ربما لا يفهمون الترجمة العربية للمصطلح ، وهذا واقع يجب الاعتراف به ، وقد استخدمت الترجمة العربية بجوار المصطلح الأجنبي في كثير من المواضع ، والتزمت بذكر المصطلح باللغة الإنجليزية فقط - وبدون ترجمة - في بعض الأحيان ، إما لشيوع المصطلح ، أو لأنه سبق ترجمته في موضع آخر . وعالجت هذه المشكلة جزئياً بعمل قاموس صغير في نهاية الكتاب للمصطلحات الأجنبية التي استخدمتها دون ترجمة . مع ملحوظة أن هذا القاموس لا يشمل كل الكلمات الإنجليزية في الكتاب ، ولكنه يشمل فقط الكلمات التي استخدمت أحيانا دون ترجمة أما الكلمات التي ترجمتها بالكتاب فلم أضعها بالقاموس).

- وينقص هذا الكتاب أيضا وضع المراجع التفصيلية لكل الأجزاء أولا بأول ، والسبب في ذلك يرجع إلى أنى كنت منذ البداية قد عزمت على كتابة المراجع مجمعة في نهاية الكتاب كما في كتيبي السابقة ، ولكنى وجدت ملاحظات من بعض الأساتذة أثناء المراجعة تطلب منى وضع المراجع مع كل جزئية ، ورغم اقتناعى بوجهة نظر هؤلاء الأساتذة والزلاء إلا أن الوقت قد فات لتدارك هذا الأمر ، فالكتاب استغرق إعدادة وكتابته عدة سنوات ، ورجعت خلالها إلى عشرات إن لم تكن مئات المراجع والمواقع على شبكة الإنترنت ، وللأسف فات الوقت لأتذكر المرجع الخاص ببعض الجزئيات ومن ثم ظلت هذه السلبية باقية ، وإن كانت المراجع في نهاية الكتاب تمثل أهم المراجع فعلا التي استقدت منها بدرجة كبيرة.
- أخيرا ، سيجد البعض أن هناك موضوعات لم يتم التطرق إليها في هذا الكتاب رغم أهميتها القصوى ، على سبيل المثال فإن الباب الثالث يتناول محطات التحويل الكهربائية ولا يوجد فيه أى حديث عن محولات القوى الكهربائية التي هى عصب هذه المحطات ، كما أن الكتاب يخلو من الحديث عن نظم الحماية الكهربائية . وظنى أن من سبرى هذا النقص فى الكتاب هم فقط الذين لم يطلعوا على الكتب السابقة التي كتبتها منذ سنوات (كتاب المرجع فى محولات القوى الكهربائية ، وكتاب نظم الحماية الكهربائية ، وكتاب المرجع فى التركيبات والتصميمات الكهربائية) . فقد خصصت كتابا منفصلا لمحولات القوى الكهربائية ، وكتابا منفصلا لنظم الوقاية ، وبالطبع أشرت إلى الرجوع إليهم فى ثنايا الكتاب.

وإن كنت أجد للبعض عذرا فيما يتعلق بنظم الحماية التي أجد أن كتابى : نظم الحماية الكهربائية ، علم وفن ، يحتاج لبعض الإضافات ، وإن شاء الله لو بقى لى عمر سأكتب نسخة معدلة من كتاب الحماية ، تعالج كثيرا من أوجه النقص فيه ، خاصة أنه كان أول كتاب أكتبه ، ويحتاج فعلا للتوسع فى شرح بعض الموضوعات.

ملحوظة : ربما أيضا تجد بعض الأخطاء الإملائية أو النحوية ، وهذا غير مستبعد ، فقد تجد بعضا من هذه الأخطاء ، والتي يمكن تجميعها لاحقا فى ملحق للتوصيات الإملائية أو النحوية إن وجدت.

وأختتم مقدمة هذا الكتاب بحديث رسول الله ﷺ :

إذا مات ابن آدم انقطع عمله إلا من ثلاث: صدقة جارية ، أو علم ينتفع به ،
أو ولد صالح يدعو له.

وعلى غرار كتبي الثلاثة السابقة فقد جعلت هذا الكتاب **وقفاً لله** ، ولم أسع لطباعته حتى يكون صدقة جارية ، وعلماً ينتفع به أكبر عدد ممكن من أبنائى طلاب ومهندسي القوى الكهربائية فى الوطن العربى . وبذلك أسأل الله أن تتحقق من خلال هذا الكتاب المعانى الثلاثة فى حديث رسول الله صلى الله عليه وسلم.

أ.د محمود جيلانى

زهراء المعادى - سبتمبر 2016 .

للتواصل مع المؤلف:

drgilany@gmail.com

تَصْدِيرٌ



فى أواخر عام 1992 كنت على موعد مع مناقشة رسالة الدكتوراه الخاصة بى ، وكانت فى مجال الوقاية الرقمية Digital Protection ، وكنت أدرس بجامعة Calgary بكندا تحت إشراف أستاذى الكبير Om Prakash MALIK .

وقد جلست معه فى ذلك الوقت لنتفق على أسماء الممتحنين ، وكانت المشكلة فى الممتحن الخارجى ، وكان رأى الدكتور مالك صادما لى ، إذ رشح لى البروفسور Mohindar S. Sachdev الأستاذ بجامعة Saskatoon . ولمن لا يعرف هذا الاسم يكفى أن يتابع منشورات الـ IEEE ليكتشف أن هذا الأستاذ هو رقم واحد فى العالم فى مجال الـ Digital Protection ، وكنت قبل هذا الاجتماع بشهور قد حضرت معه دورة لمدة أسبوع دارت حول الجديد فى عالم الـ Digital Protection ، و كان هو المحاضر الأساسى فى هذه الدورة ، وكان معه فى هذه الدورة أيضا تلميذه النجيب الذى صار الآن واحدا من ألمع الأساتذة فى مجال الوقاية الرقمية ، وهو البروفسور Tarlochan Sidhu ، (الأساتذة الثلاثة المذكورين هنا من الهند) . وكنت خلال الدورة مبهورا بأسلوبهما و غزارة علمهما ، وأدركت حينها لماذا اختارت الـ IEEE البروفسور Sashdev ليكون هو المنسق لأشهر Two Tutorials فى مجال الـ Digital Protection ، ولكن أن يكون هو ممتحنا لى فى الدكتوراه فهذا شئ آخر ، ولكن لم يسعنى أن أعترض على اختيار د مالك .

وجاء يوم المناقشة ، وقدمه الدكتور مالك ليبدأ الأسئلة ، وكنت متوقعا أن يبدأ بسؤالى فى أهمية موضوع الرسالة مثلا ، ففوجئت به يصدمنى بأول سؤال ، وكان سؤالاً عاما فى موضوع الوقاية الرقمية لا علاقة له بالرسالة ، وكان السؤال تحديدا هو : Digital Protection is a Digital Filter. Explain ، وبالطبع أخذتني الصدمة من هذا السؤال الأول ، ولم تحضرني أى إجابة ، فقلت فى نفسى لماذا لا أستعمل معه خطة الطلبة لدينا حين لا يعرف أحدهم إجابة السؤال فيلج ويدور فى الحديث حول الموضوع ويستترسل حتى يظن المستمع أن هذا الطالب بحر علم ، ولكن الخطة فشلت ، والرجل فى كل مرة يتركنى أقول ماشئت ثم أفاجأ به يقول لكك لم تجب على السؤال ويعيده بنصه مرة أخرى ، وبدا الارتباك واضحا على ، فتدخل د مالك بصرامة ، ووجه الكلام للبروفسور Sashdev فى جملة واضحة: Mohendar, that is enough .

فالدكتور مالك تدخل ليدافع عن تلميذه حتى لا أفقد تركيزى تماما ونحن مازلنا فى بداية المناقشة ، وطلب تغيير السؤال إلى وجهة جديدة ، وكان البروفسور Sashdev لا يقل احترافية عن أستاذى فبدأ يسألنى أسئلة فى موضوع

الرسالة مباشرة وترك الأسئلة الكبيرة العامة ، لأنه من واقع إجابتى عن السؤال الأول عرف أن الواقف أمامه طالب دكتوراه عادى ليس بهذا التميز الذى ظنه حين قرأ الرسالة.

لماذا أبدأ الكتاب بهذه القصة؟

فى اليوم التالى بعد انتهاء المناقشة استدعانى د. مالك منفردا لمكتبه ، وهو الذى كان بالأمس يدافع عني ، ففوجئت به يعاتبى على أسلوبى فى الرد على السؤال الأول ، وقال ما معناه لماذا تخجل أن تقول لا أعرف.

وتذكرت الإمام مالك بن أنس رحمه الله حين سئل عن ثلاثين مسألة فأجاب عن عشرة وقال فى الباقي لا أعلم ، فقال له السائل : وماذا أقول للناس الذين أرسلونى إليك لأسألك ؟ فقال فى ثقة : قل لهم مالك بن أنس لا يعلم.

تعلمت هذا الدرس ، وأصبحت من وقتها ليس فقط لا أخجل أن أقول لطالب يسألنى فى المحاضرة سؤالاً ما لا أعرفه فأقول له لا أعرف ، بل صار أحب شئ إلى أن يسألنى الطالب سؤالاً لا أعرفه حتى أبحث عن إجابته وأرجع الأسبوع التالى بالإجابة فأفيد الطلبة بمعلومة كنت أنا وهم لا نعرفها.

وهذا الكتاب نتاج هذه المدرسة ، مدرسة الطلاب المميزين الذين يجلسون فى المحاضرة ويسألون بعمق ، فمفتاح العلم هو السؤال ، وكان هؤلاء الطلاب المميزون خلال سنوات عملى فى هندسة القاهرة ، أو فى كلية الدراسات التكنولوجية بالكويت ، أو خلال عملى بالجامعة الأمريكية بالقاهرة ، هم أصحاب هذا الكتاب ، وكل معلومة جديدة فيه أصلها يرجع لهؤلاء الطلاب ، ولذا كان تصدير الكتاب موجه لهم.

شكرو تقدير

لا أبالغ إن قلت أن من أهم ما يميز هذا الكتاب تنوع فريق المراجعة ، فقد تعاون معى فى مراجعة هذا الكتاب:

- 1- العديد من أساتذتى بهندسة القاهرة ، الذين شارك كل منهم فى مراجعة جزء من الكتاب ، منهم أ.د. حسين أنيس ، و أ.د. زينب هانم عثمان ، وأ.د. عصام أبو الذهب ، وأ.د. حسام كمال ، مع شكر خاص لأ.د. دعاء خليل ، التى راجعت بعناية ودقة جميع أبواب الكتاب.
- 2- وقد شارك فى المراجعة أساتذة كبار من جامعات أخرى ، منهم أ.د. مصطفى عيسى (هندسة حلوان) ، أ.د. نبيل عباسي (هندسة الاسكندرية) ، أ.د. تامر كوادى (هندسة المنوفية) ، أ.د. سعيد المصرى (هندسة حلوان) .
- 3- ومن أهم فئات المراجعين لهذا الكتاب نخبة مميزة من كبار المهندسين العاملين بقطاعات وزارة الكهرباء المختلفة فى مصر ودول الخليج ، منهم م. موسى سعيد أبو خطوة رئيس قطاع الوقاية بشركة توزيع وسط الدلتا ، م. كامل بدرخان كبير مفتشى الكابلات الكهربائية بشركة النقل السعودية ، م. أحمد نصر (شركة الفناار السعودية) .
- 4- وبالطبع كعادته فى كل الكتب السابقة فقد قام بالمراجعة أ.د. م. سيد سعد صاحب المنتدى المشهور والصديق القديم ، وكذلك المهندسة المميزة شامية الزونة شريكته فى الحياة ، وفى إدارة الموقع.
- 5- وشاركت أيضا مجموعة رائعة من المهندسين فى مصر من ذوى الخبرات العملية ، و كل واحد منهم له مجال تخصصى مختلف وبيئة عمل فى مجال القوى الكهربائية مختلفة عن الآخر، وقد شاركوا إما بالمراجعة أو بإمدادى ببعض الخبرات العملية ، منهم م. أحمد الرفاعى (محطة توليد غرب القاهرة) ، وم. أحمد فؤاد ، و م. حسين شمعة (شركة النقل المصرية) و م. حسام صيرة و م. أحمد الحناوى (شركة توزيع جنوب القاهرة) ، والمهندس الاستشارى عبد الله الطوخى (شركة سماتر بور للاستشارات) ، وكان لكل منهم جهد مميز فى المراجعة والإضافات.
- 6- ولأن الطلاب هم فئة رئيسية مستهدفة فقد شارك ممثل لهم ، وهو أحد الطلاب المميزين بالسنة الثالثة 2015-2016 بهندسة القاهرة (م أحمد طالب) ، مشكورا فى مراجعة الكتاب.
- 7- وأجندنى أختتم سجل الشكر والتقدير باثنين من كبار الأساتذة فى مصر ، توفيا إلى رحمة الله ، وكانا يسعيان بحماس لمراجعة الكتاب ، هما : أ.د. محمد مصطفى سلام (رحمه الله) الأستاذ بجامعة حلوان وقد ناقشت معه بعضا من نقاط الباب السادس فى الكتاب ، وأ.د. رشدى رضوان أستاذى بهندسة القاهرة ، الذى طلب منى أن أطبع له الباب الثالث فى الكتاب ليراجعه مكتوبا ، و لكنه توفى إلى رحمة الله قبل أن يستلمه منى بيوم واحد. رحمهما الله رحمة واسعة.
- 8- شكر خاص لفنان غير مشهور : يوسف محمود جيلانى (14 سنة) على تصميم الغلاف.

فهرس المحتويات

Table of Contents

مقدمة الكتاب

أ	لغة الكتاب.....
ب	ما هى منظومة القوى الكهربائية ؟.....
ت	لمن هذا الكتاب؟.....
ت	ماذا ينقص هذا الكتاب؟.....
2	أهم مصادر الطاقة.....
	علم الطاقة.....
3	
4	وحدات قياس الطاقة.....
6	تصنيف محطات التوليد الكهربائية.....
7	فصول هذا الباب.....
1	1.....
9	1.1 الشبكات الكهربائية الموحدة.....
10	1.1.1 أهمية الشبكات الكهربائية الموحدة.....
11	1.1.2 الربط الكهربى بين الدول العربية.....
13	1.1.3 أهم ميزات الربط الكهربى.....
14	1.1.4 نماذج للشبكات الموحدة.....
21	1.1.5 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية.....
21	1.1.6 الفقد فى الشبكات.....
22	1.1.7 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟.....
26	1.1.8 ما المقصود بالـ Spinning Reserve ؟.....

26.....	كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟	1.2
27	التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال	1.2.1
28	كيف يحدث الـ Blackout ؟	1.2.2
28	أشهر أسباب حدوث الـ Blackout	1.2.3
29	خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration	1.2.4
30.....	طرق التحكم فى التردد :	1.3
30	استخدام المنظم Governor فى التحكم فى التردد	1.3.1
30	طريقة عمل الـ Governor فى المحطات البخارية:	1.3.2
31	أنواع الـ Governor :	1.3.3
32	لماذا الخوف من تغير التردد؟	1.3.4
32	لماذا نستخدم نظام الـ 50 أو 60 هيرتز؟	1.3.5
33.....	ربط المولدات على التوازي بالشبكة	1.4
34	ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟	1.4.1
34	شروط تحقق تزامن المولدات:	1.4.2
37.....	خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا	1.5
37	الخطوة الأولى: ضبط السرعة	1.5.1
37	الخطوة الثانية: ضبط الجهد	1.5.2
37	الخطوة الثالثة : ضبط الـ phase sequence	1.5.3
38	الخطوة الرابعة : ضبط الـ phase shift	1.5.4
38	الطريقة الآلية:(Automatic method)	1.5.5
38	ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟	1.5.6
39.....	توزيع القدرة بين المولدات فى الشبكة LOAD SHARING	1.6
40	توصيل المولد منفردا على حمل معين	1.6.1
41	توزيع الأحمال بين المولدات المتصلة على التوازي	1.6.2
43	توزيع القدرة الفعالة بين المولد والشبكة العامة	1.6.3
45	توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات	1.6.4
57.....		2
58.....	أساسيات المحطات البخارية	2.1
59	ملخص الدورة البخارية	2.1.1
60	اختيار مواقع المحطات البخارية	2.1.2

60	كفاءة المحطات البخارية.....	2.1.3
61	الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية.....	2.1.4
62.....	القسم الكيميائي في المحطات البخارية.....	2.2
62	نظرية عمل القسم الكيميائي:.....	2.2.1
62	ما هو الرقم الهيدروجيني PH ؟.....	2.2.2
63	تحسين معامل الـ PH للماء.....	2.2.3
63	إختبارات القسم الكيميائي.....	2.2.4
64.....	القسم الميكانيكي في المحطات البخارية.....	2.3
64.....	الغلاية (BOILER).....	2.4
65	الفرن (Furnace).....	2.4.1
66	الدرم (Drum).....	2.4.2
66	الموقر (Economizer).....	2.4.3
67	المسخنات (Heaters).....	2.4.4
68	وظيفة الـ Deaerator.....	2.4.5
68	المدخنة Chimney.....	2.4.6
69	الآلات والمعدات المساعدة في المحطة.....	2.4.7
69.....	التربينة (TURBINE).....	2.5
70	نظام التزييت في التربينة.....	2.5.1
70	عملية تدوير التربينة.....	2.5.2
71.....	المكثف (CONDENSER).....	2.6
73.....	الدورة البخارية تفصيليا.....	2.7
74	تغير الحمل على الوحدة.....	2.7.1
75	فصل الوحدة.....	2.7.2
77.....	مكونات محطات التوليد الغازية :	2.8
78	الكباس الرئيسي للوحدة.....	2.8.1
78	غرفة الاحتراق.....	2.8.2
79	التربينة الغازية.....	2.8.3
80	المولد الكهربائي.....	2.8.4
80	الآلات والمعدات المساعدة للتربينة الغازية.....	2.8.5
80	طريقة البدء في المحطات الغازية.....	2.8.6

81	BLOW OFF VALVES صمامات طرد الهواء	2.8.1
84	فكرة عمل الدورة المركبة COMBINED CYCLE	2.9
85	وحدة الـ HRSO:	2.9.1
86	كفاءة محطات الدورة المركبة:	2.9.2
86	مزايا محطات الدورة المركبة:	2.9.3
87	أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر:	2.9.4
89	3	
90	مكونات المولد الكهربى	3.1
91	العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor	3.1.1
92	منظومة التبريد	3.1.2
93	كيف يتم توليد المجال المغناطيسى؟	3.1.3
93	العناصر المرتبطة بمنظومة الـ Excitation	3.1.4
95	كيف يتم التحكم أوماتيكيا فى قيمة الجهد؟	3.1.5
96	الجيل الجديد من المولدات	3.1.6
99	المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد	3.2
100	محول الرفع الرئيسى Step up Transformer	3.2.1
102	الغرف والعنابر الرئيسة بمحطة التوليد	3.3
103	منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد	3.4
103	خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة Power Center	3.4.1
103	خلايا الجهد المنخفض Motor Control Center	3.4.2
104	غرفة الشواحن والبطاريات:	3.4.3
	AUXILIARY المنظومات المساعدة فى القسم الكهربى	3.5
105	SYSTEMS	
106	منظومة الاتصالات (Communication System)	3.5.1
106	نظام التحكم (Control System)	3.5.2
106	منظومة الحماية: (Protection System)	3.5.3
108	مكونات النظام الكهربى فى محطة توليد غازية:	3.6
109	كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربائية:	3.6.1
111	4	

4.1	أساسيات المحطات النووية	111
4.1.1	طاقة الربط النووي	111
4.1.2	فكرة الطاقة النووية	113
4.1.3	تخصيب اليورانيوم	115
4.1.4	مكونات المفاعل النووي	116
4.2	مخاطر المفاعلات	118
4.2.1	هل يمكن أن تنفجر المفاعلات النووية كالقنابل؟	119
4.2.1	ما هو الماء الثقيل؟	119
4.2.2	ما هو مفاعل كندو؟	119
5	محطات التوليد المائية	123
5.1	محطات التوليد المائية	125
5.1.1	طريقة توليد الطاقة الكهرومائية	125
5.1.2	نظرية العمل	127
5.1.3	ما هو الارتفاع الحرج؟	128
5.1.4	محطات الضخ والتخزين	129
6	قواعد أساسية فى الطاقة الشمسية	131
6.1	قواعد أساسية فى الطاقة الشمسية	133
6.1.1	لماذا يكون الصيف أعلى فى درجة الحرارة؟	133
6.1.2	إلى أى جهة توجه الألواح الشمسية؟	134
6.1.3	كيف أختار زاوية الميل جهة الجنوب؟	134
6.2	الاستفادة من الطاقة الشمسية فى توليد الكهرباء	136
6.2.1	أمثلة للمحطات الكهربائية الكهروضوئية	136
6.2.2	ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة	138
6.3	الأنواع المختلفة من محطات الطاقة الحرارية	140
6.3.1	منظومة القطع المكافئ	140
6.3.2	منظومة البرج المركزى	141
6.3.3	منظومة القطع الدائرى	142
6.3.1	من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟	144
6.3.2	استخلاص الحرارة	145
6.4	أنواع محطات الـ GEOTHERMAL	146

146	محطات البخار الجاف:	6.4.1
147	محطات الدائرة المزدوجة:	6.4.2
148	TIDAL POWER STATIONS أساسيات عملية المد والجزر	6.5
149	فكرة التوليد	6.5.1
152	طاقة الرياح	6.6
152	الطاقة الشمسية هي مصدر الرياح	6.6.1
152	كيف تعمل توربينات الرياح؟	6.6.2
153	مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح	6.6.3
155	كمية الطاقة المولدة من الرياح	6.6.4
155	العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة	6.7
156	زاوية الهجوم:	6.7.1
157	منحني القدرة :	6.7.2
158	مميزات طاقة الرياح وعيوبها:	6.7.3
158	ترتيب التربينات في مزارع الرياح	6.7.4
160	طاقة الرياح في مصر	6.8
162	محطات الرياح في البحار والمحيطات	6.9
165	APPENDIX A	
165	العوامل المؤثرة في اقتصاديات المحطات	
166	Rate of Interest معدل الفائدة	
166	Depreciation معدل الإهلاك	
167	Tariff تسعير الكهرباء المباعة	
171	تعظيم عائد الاستثمار في محطات الكهرباء	
172	مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة في أمريكا	
177	7	
177	الجهود المستخدمة في شبكات النقل	7.1
178	اختيار جهد النقل	7.1.1
179	نبذة عن تطور نقل الطاقة	7.2
179	مشاكل النقل بنظام الـ AC	7.2.1
180	مقارنة بين النقل باستخدام الـ HV-AC باستخدام الـ HV-DC	7.3
181	عيوب نظام الـ HV-DC	7.3.1

182	مميزات نظام الـ HV-DC	7.3.2
184	متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟	7.3.3
184	مقارنة التكلفة فى النظامين	7.3.4
185	مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية	7.4
187	المواضيع الهامة فى دراسة خطوط النقل	7.5
190	8	
190	تصميم الأبراج	8.1
192	عناصر مكونات الأبراج	8.1.1
194	المسافات فى الأبراج الكهربائية	8.2
194	ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض	8.2.1
195	المسافة بين البرج والذى يليه	8.2.2
195	مسافة طريق مرور الأبراج Right of Way	8.2.3
197	تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج	8.2.4
200	أنواع الأبراج :	8.3
200	أبراج تعليق Suspension Towers	8.3.1
201	أبراج شد Tension Towers	8.3.2
201	أبراج التبديل Transposition Towers	8.3.3
202	الموصلات فى أبراج الجهد العالي :	8.4
203	خصائص المواد المستعملة فى صناعة الموصلات	8.4.1
204	أنواع الموصلات المستخدمة فى خطوط النقل الهوائي	8.5
204	الموصلات المجذولة (Stranded Conductors)	8.5.1
205	موصلات الألمونيوم الخالص	8.5.2
205	الألمونيوم المقوي بالصلب :	8.5.3
207	موصلات سبائك الألمونيوم	8.5.4
207	الألمونيوم المقوي بسبيكة الألمونيوم	8.5.5
207	سبيكة الألمونيوم المقوي بالصلب :	8.5.6
207	أطوال الموصلات	8.5.7
208	الاكسسوارات ACCESSORIES التى تستخدم فى الخطوط	8.6
208	فواصل الموصلات	8.6.1
209	خامد الاهتزازات Dampers	8.6.2

كرات تحذير الطائرات.....	210	8.6.3
9.....213		
وظيفة العوازل:	214	9.1
تصنيف العوازل حسب الشكل التصميمي:	214	9.2
تصميم عوازل الطاقة والمسمار	214	9.2.1
تصميم عوازل الساق الطويلة	215	9.2.2
تصنيف العوازل حسب مادة الصنع:	216	9.3
عوازل بورسلين: Porcelain	216	9.3.1
العوازل الزجاجية: Glasses	217	9.3.2
العوازل المطاطية: rubber	217	9.3.3
الأعطال التي تتعرض لها العوازل:	219	9.4
تأثير التلوث على أداء العازل	219	9.4.1
كيفية حدوث الومضة الكهربائية Flashover	219	9.4.2
ما هي الـ Creepage Distance ؟	220	9.4.3
تنظيف العوازل	222	9.4.4
أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل	223	9.5
تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل	223	9.5.1
ظاهرة الكورونا	224	9.6
أسباب ظاهرة الكورونا:	225	9.6.1
الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا:	226	9.6.2
توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل:	227	9.7
رفع كفاءة توزيع الجهد	228	9.7.1
علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل	230	9.7.2
أسلوب الـ Insulation Coordination	232	9.7.3
10.....234		
مقدمة	234	10.1
مقاومة الخط	234	10.2
العوامل المؤثرة على قيمة مقاومة الموصل	235	10.2.1
ظاهرة التأثير السطحي Skin Effect	235	10.2.2

236	العوامل المؤثرة على الـ Skin Effect	10.2.3
236 ...	Bundle Conductors لماذا نلجأ لاستخدام حزم من الموصلات	10.2.4
236	القيمة الحثية للخط وتأثيراتها	10.3
236	ما هي الـ Inductance , L ؟	10.3.1
238	تأثير الـ Inductance على الحدود القصوى لنقل الطاقة	10.3.2
239	هل الخطوط القصيرة أفضل في نقل الطاقة؟	10.3.3
240	تأثير الـ Inductance على حدود القدرات غير فعالة	10.3.4
241	سعة الخطوط CAPACITANCE وتأثيراتها	10.4
243	مصطلح الـ Admittance, Y	10.4.1
243	طرق تمثيل خطوط النقل رياضياً	10.5
244	تمثيل الخطوط القصيرة :	10.5.1
245	تمثيل الخطوط متوسطة الطول	10.5.2
247	تمثيل الخطوط الطويلة :	10.5.3
10.6	الظواهر التي تترتب على وجود الـ CAPACITANCE في الخطوط	
250		
250	ظاهرة Ferranti Effect	10.6.1
251	ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر	10.6.2
253	ظاهرة القوس الأرضى Arcing Ground	10.6.3
11	11.1 مفاهيم أساسية	256
256	تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربائية	11.1.1
257	مفهوم معامل القدرة Power Factor	11.1.2
258	القدرة غير فعالة REACTIVE POWER	11.2
261	هل القدرة غير فعالة لافائدة لها؟	11.2.1
262	إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power	11.2.2
263	دور القدرة غير الفعالة في خطوط النقل	11.2.3
11.3	ما هو مفهوم الـ SURGE IMPEDANCE LOADING, SIL ؟	
264		
266	أهمية قيمة الـ SIL	11.3.1
267	معوضات القدرة غير فعالة	11.4

11.4.1	الفرق بين مرور الـ P و مرور الـ Q فى الخطوط.....	267
11.4.2	الهدف من استخدام هذه التقنيات :.....	268
11.4.3	التحكم فى عناصر الشبكة.....	268
11.5	الأجهزة التقليدية للتحكم فى تدفق القدرة غير الفعالة.....	269
11.5.1	المولدات الكهربائية :	269
11.5.2	المعوضات المتزامنة Over-Excited Synchronous Motor : ..	270
11.5.3	استخدام Shunt Reactors :	270
11.5.4	استخدام الـ Series Capacitors :	271
11.5.5	استخدام الـ Shunt Capacitors :	271
11.6	ثانيا : أجهزة الـ FACTS للتحكم فى تدفق القدرة	272
11.6.1	أجهزة المعوضات الثابتة SVC, Static VAR Compensators	273
11.6.2	أجهزة الـ STATCOM :	275
11.6.3	أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators : ...	276
11.6.4	منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controllers	277
12	280
12.1	مقدمة.....	280
12.1.1	أهمية محطات الـ Transmission S/S	281
12.1.1	أمثلة عملية.....	282
12.1.2	وظائف أخرى لمحطات التحويل.....	285
12.1.3	تصنيف محطات التحويل.....	287
12.2	الهيكل العام لمحطة التحويل	289
12.2.1	المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي.....	290
12.2.2	المنطقة الثانية: منطقة المحولات.....	291
12.2.3	المنطقة الثالثة: منطقة خلايا الجهد المتوسط.....	291
12.2.4	القسم الرابع: منظومة الـ DC.....	291
12.2.5	القسم الخامس: منظومة التحكم.....	292
12.2.6	القسم السادس : منظومة الاتصالات.....	292
12.2.7	القسم السابع : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق	292
12.2.8	القسم الثامن : منظومة التأريض	292
12.3	الأعمال الكهربائية لإنشاء محطة تحويل	293

12.4	خريطة الباب	295
13		298
13.1	قراءة مخطط المحطة	298
	الجزء الأول من الفصل الثالث عشر	302
	مهام منطقة الجهد العالي في محطات الـ AIS	302
13.2	مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR	302
13.2.1	النوع الأول : (Valve Type Arrestor)	303
13.2.2	النوع الثاني : Metal-Oxide (ZnO) Arrestor	304
13.3	سكاكين الفصل ISOLATORS	305
13.3.1	أساليب فتح سكاكين الفصل	307
13.4	تسلسل عمليات الفصل و التشغيل في المحطة	309
13.4.1	خطوات فصل خط هوائي (المغذى Feeder) يتبع الآتى:	309
13.4.2	خطوات توصيل خط هوائي يتبع الآتى:	310
13.4.3	تشغيل مجموعتان من القضبان الرئيسية	310
13.4.4	ما الفرق بين فصل الخط ، وعزل الخط ، وانسحاب الجهد؟	310
13.5	محولات التيار CURRENT TRANSFORMER	311
13.6	محولات الجهد	312
13.7	محولات التأريض (EARTHING TRANSFORMER)	314
13.8	القواطع CIRCUIT BREAKERS	316
13.8.1	أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربائية:	317
13.8.2	الأجزاء الرئيسية بالقاطع	318
13.8.3	آليات الحصول على القوة المحركة:	318
13.9	أنواع القواطع بالمحطات	320
13.9.1	النوع الأول : Oil CB	320
13.9.2	النوع الثاني Air Blast CB :-	322
13.9.3	النوع الثالث : القاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) :	323
13.9.4	النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الـ SF6	324
13.9.5	ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6:	325
13.9.6	ما هو دور جهاز الـ anti-pumping relay ؟	327
13.9.7	ملحوظات من الواقع:	327
13.9.8	توصيف الـ Circuit Breakers:	329
13.10	الاختبارات التي تتم على قواطع الجهد العالي والمتوسط	330

330	الفحوصات العامة للقواطع	13.10.1
331	اختبارات قوة العزل بالقاطع	13.10.2
332	فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة	13.10.3
333	اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل:	13.10.4
334	اختبارات تسلسل التشغيل	13.10.5
335.....	الجزء الثاني من الفصل الثالث عشر	
335.....	منطقة الجهد العالي في محطات الـ GIS	
336.....	المهام في محطات الـ GIS	13.11
337	مكونات الـ Bay	13.11.1
340	الدخول إلى محطة GIS	13.11.2
341	الحماية من الصواعق في محطات الـ GIS	13.11.3
344.....	مقارنة المحطات الهوائية والغازية	13.12
346	مميزات المحطات الهوائية:	13.12.1
346	عيوب المحطة الهوائية :	13.12.2
347	مميزات محطات الـ GIS:	13.12.3
348	عيوب محطات الـ (GIS):	13.12.4
348	مقارنة بين اقتصاديات المحطات	13.12.5
351.....	14	
351.....	تصنيع القضبان العمومية	14.1
353	مميزات وعيوب الـ (Rigid Bus) :	14.1.1
354.....	ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS	14.2
356.....	النظام الأول: SINGLE BUS BAR	14.3
356	محطات تحويل أحادية القضبان	14.3.1
356	محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان	14.3.2
358.....	النظام الثاني: نظام القضبان المزدوجة DOUBLE BUS BAR	14.4
358	النوع الأول من القضبان المزدوجة : Double BB with Single CB	14.4.1
359	النوع الثاني Double BB with Double CB	14.4.2
360	النوع الثالث: Double BB with One and Half CB	14.4.3
364	النوع الرابع Main and Transfer	14.4.4
366.....	النظام الثالث : الـ RING SYSTEM أو MESH-SYSTEM	14.5
367.....	مقارنات بين الأنواع المختلفة	14.6
368.....	15	
368.....	فكرة الأرضى	15.1

369	أشكال التأريض	15.1.1
370	التأريض فى محطات الجهد العالي	15.2
371	جهد اللمس	15.2.1
372	لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضى منخفضة جدا؟	15.2.2
372	جهد الخطوة	15.2.3
373	كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟	15.2.4
374	شبكات التأريض فى المحطات الكهربائية	15.3
376	ما هى الـ Ground mat ؟	15.3.1
377	أشكال الـ Earthing Grid	15.3.2
378	خطوات التصميم	15.4
378	خطوات ماقبل التصميم	15.4.1
379	الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة	15.4.2
380	الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor	15.4.3
381	الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود	15.4.4
385	الخطوة الرابعة: حساب الحدود الأمانة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس	15.4.5
386	الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها	15.4.6
387	الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى	15.4.7
388	الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض	15.4.8
390	الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR	15.4.9
390	الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين	15.4.10
391	الخطوة العاشرة : المقارنات	15.4.11
399	16	
400	تغذية مساعدات المحطة	
400	التغذية بنظام الـ AC SYSTEM :	16.1
401	التغذية بنظام الـ DC SYSTEM :	16.2
402	الشواحن : (Battery Chargers)	16.2.1
402	طرق شحن البطاريات :	16.2.2
403	هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟	16.2.3
403	عيوب وميزات البطارية الحامضية	16.2.4
404	عيوب وميزات البطارية القلوية	16.2.5
404	الشروط الواجب توافرها فى غرفة البطاريات بمحطات الكهرباء :	16.2.6
405	صيانة البطاريات :	16.2.7
405	أعطال البطارية وكيفية إصلاحها :	16.2.8
406	قسم الوقاية والتحكم	
407	نظام الإنذار فى المحطات التقليدية	16.2.1

409..... نظم التحكم الحديثة

410	وظائف نظام الـ SAS	16.2.2
412	مقارنة بين التحكم فى المحطات التقليدية والمحطات الحديثة	16.2.3
413	هيكل التحكم فى نظام الـ SAS	16.2.4

415..... منظومات الوقاية الكهربائية فى محطات التحويل

416	نموذج لمنظومة حماية أحد المغذيات	16.2.5
417	نموذج لمنظومة حماية المحول	16.2.6

418..... وسائل الاتصالات بمحطات التحويل

418	الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC	16.2.7
419	دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap	16.2.8
420	الاتصالات عن طريق : Pilot Cable	16.2.9
420	الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO	16.2.10
420	الاتصالات اللاسلكية: Wireless	16.2.11

422..... نظم الوقاية من الحريق فى المحطات

422	مصادر الخطورة فى المحطات	16.3
422	نظرية الإطفاء	16.3.1
423	مكونات نظام الإطفاء الثابت:	16.4
424	آلية الإطفاء	16.4.1
425	أنواع أنظمة إطفاء الحريق	16.5
425	الماء تحت ضغط الهواء	16.5.1
426	نظام ثاني أكسيد الكربون	16.5.2
426	نظام الماء تحت ضغط ثاني أكسيد الكربون	16.5.3
427	نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول:	16.5.4

428..... ملحق الباب الثالث

428..... تعليمات التشغيل الخاصة بمحطات المحولات

433..... 17

433	مقدمة	17.1
434	معرفة وتحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات:	17.1.1
435	القدرة على عمل الدراسات الخاصة بالأحمال Load Studies:	17.1.2
436	القدرة على توصيف عناصر شبكات التوزيع:	17.1.3
437	معرفة البدائل المتاحة فى عملية تصميم شبكات الجهد المتوسط	17.1.4
437	القدرة على عمل الدراسات المطلوبة لعملية التخطيط	17.1.5
438	استخدام الـ OPTIMIZATION TECHNIQUES	17.2

438	كيفية الوصول للحل الأمثل	17.2.1
440	خريطة هذا الباب	17.3
442.....	18	
442	مراحل تصميم شبكة توزيع	18.1
442	المرحلة الأولى: تقدير الأحمال	18.1.1
444	المرحلة الثانية : إختيار جهد محطة التوزيع	18.1.2
446	المرحلة الثالثة : اختيارات المحطة / المحطات الرئيسية.....	18.1.3
447	المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع الابتدائية.....	18.1.4
449	المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية Radial/Ring ؟	18.1.5
451	كيف يتم حساب مقطع الكابل فى التغذية الحلقية؟.....	18.1.6
451	المرحلة السادسة : حسم نوعية محطة التحويل الابتدائية هوائية/غازية؟.....	18.1.7
452	المرحلة السابعة : اختيار نوعية قضبان التوزيع	18.1.8
455.....	19	
456	ضخامة منظومة التوزيع	19.1
457	العنصر الأول فى منظومة الجهد المتوسط: الموزع	19.2
457	المهام داخل مبنى الموزع Distributor	19.2.1
458	لوحة التوزيع (الموزع)	19.2.2
460	مكونات الخلية.....	19.2.3
461	المهام الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle	19.2.4
462	المهام الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing	19.2.5
462	المهام الموجودة بخلية الربط :.....	19.2.6
462	مخطط لوحة الموزع.....	19.2.7
463	المهام الأخرى الموجودة بمبنى الموزع:	19.3
463	البطاريات:	19.3.1
464	الشاحن (التونجر)	19.3.2
465	ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟	19.3.3
465	التحكم فى لوحات الجهد المتوسط.....	19.3.4
466	العنصر الثانى فى منظومة الجهد المتوسط: محولات التوزيع.....	19.4
470	استخدام الفيوزات فى شبكات التوزيع	19.4.1
470	مميزات وعيوب الفيوز Fuse	19.4.2
471	أرقام هامة لتوصيف الفيوز	19.4.3
473	أنواع الفيوزات	19.4.4
474	قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب	19.4.5
475	تنسيق الفيوزات فى شبكات التوزيع	19.4.6
481	ضبط قيم أجهزة حماية محولات التوزيع:	19.4.7

487	حماية محولات التوزيع من الجهود العالية	19.4.8
488	العنصر الثالث فى منظومة الجهد المتوسط: وحدة الربط الحلقية	19.5
489	صناديق التوزيع فى شبكة الجهد المنخفض :	19.5.1
490	تنسيق صناديق التوزيع	19.5.2
498	20	
493	أشكال منظومة التغذية	20.1
493	نظام الشبكات الإشعاعية	20.1.1
494	نظام الـ Loop المفتوحة	20.1.2
496	نظام الـ Loop المغلقة	20.1.3
497	تغذية كبار المشتركين	20.1.4
497	أنظمة من الواقع	20.1.5
502	تأثير دخول التوليد الموزع DG ضمن منظومة التوزيع	20.2
503	ميزات و عيوب التوليد الموزع	20.2.1
504	مشكلة التنسيق - Coordination	20.2.2
505	مشكلة الخطأ فى تقدير مسافة العطل	20.2.3
506	مشكلة ارتفاع مستوى القصر	20.2.4
506	مشكلة الانعزال Islanding	20.2.5
508	21	
508	أشكال التغذية فى شبكات التوزيع الهوائية	21.1
508	أولا الشبكات الإشعاعية Radial	21.1.1
510	ثانيا التوصيل الحلقى Ring	21.1.2
511	العناصر الأساسية فى شبكات التوزيع الهوائية	21.2
511	أبراج شبكة الجهد المتوسط	21.3
514	العوازل المستخدمة فى شبكات الجهد المتوسط	21.4
516	الاكسسورات المستخدمة فى الشبكات الهوائية	21.5
516	كلاميات الشد Tension clamp	21.5.1
517	السكاكين	21.5.2
517	النوع الأول : السكاكين الهوائية	21.5.3
518	النوع الثانى : Load Break Switch	21.5.4
518	الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط	21.6
521	أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائى RECLOSER	21.7
523	مانعة الصواعق	21.8
524	أجهزة مبيانات الأعطال	21.9

21.10	الأرضى فى شبكات التوزيع	526
21.11	المشاكل التي تتعرض لها الخطوط الهوائية بشبكة التوزيع	527
22	528	
22.1	الاعتمادية فى الشبكات	528
22.1.1	الفرق بين الـ "Reliability & Power Quality"	528
22.2	تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع VOLTAGE REGULATION	531
22.2.1	فكرة عمل منظم الجهد	531
22.2.2	مثال تطبيقي لتقدير حجم الـ AVR	533
22.3	التحكم فى شبكات التوزيع	537
22.3.1	تعريف الـ Distribution Automation	537
22.3.2	أجهزة الـ IED	537
22.3.3	نظام الـ SCADA	538
22.3.4	الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع	541
22.3.5	إشارات منقولة من محطات المحولات	541
22.3.6	إشارات منقولة من محولات التوزيع	542
22.3.7	أدوار التحكم فى شبكات الجهد المتوسط	542
22.3.8	ثانياً التحكم فى شبكة الجهد المنخفض	544
22.3.9	الـ SCADA فى شبكات التوزيع بمصر	544
22.4	منظومة الاتصالات فى شبكات التوزيع : COMMUNICATIONS	546
22.4.1	شبكة الاتصالات فى الجهد المتوسط	546
22.5	شبكات التوزيع الذكية	547
22.5.1	مكونات الشبكة الذكية	547
22.5.2	وظائف الشبكة الذكية :	551
22.6	ملحق أشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات	552
23	560	
23.1	المواد المعدنية المستخدمة فى صناعة الموصلات	560
23.1.1	ثانياً المواد المعدنية المستخدمة للحماية	561
23.2	المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات	562
23.2.1	ما معنى عازل كهربائي؟	562
23.2.2	أهم خصائص المادة العازلة كهربياً	562
23.3	مقدمة عن البوليمرات	563
23.3.1	تطبيقات البوليمرات الصناعية Synthetic Polymer	563
23.3.2	الدائن الحرارية : البولى فينيل كلورايد PVC	564

565	الجوامد الحرارية: Thermo-sets	23.3.3
565	المطاط: RUBBER	23.3.4
565	عوازل البولى إيثيلين PE ، والبولى بروبيلين PP	23.3.5
566	البولى إيثيلين التشابكي XLPE :-	23.3.6
566	أبرز مشاكل العوازل	23.4
566	المفقودات Losses	23.4.1
567	التيارات المتسربة خلال العوازل	23.4.2
567	ظاهرة WATER TREE :	23.4.3
568	تركيب كابلات الجهد العالي :	23.5
569	الموصل Conductor	23.5.1
571	حجاب الموصل (طبقة شبه الموصل) Semiconductor Layer	23.5.2
572	العزل INSULATION	23.5.3
572	حجاب العازل (شبه الموصل الثانى)	23.5.4
573	الغلاف المعدنى Metallic sheath	23.5.5
574	مزايا الأغلفة المعدنية عامة	23.5.6
575	الحشو أو (الفرشة) FILLING - BEDDING :	23.5.7
575	التسليح (التدريع) ARMOUR :	23.5.8
576	المشاكل المرتبطة بالغلاف Sheath Effect	23.5.9
578	الغلاف الخارجى Outer Sheath :	23.5.10
579	أطراف التوصيل الخارجية	23.5.11
582	مقاومة الموصل CONDUCTOR RESISTANCE	24
582	مقاومة العزل Insulation resistance	24.1
583	محاثة الكابلات CABLE INDUCTANCE	24.2
585	سعة الكابل CABLE CAPACITANCE	24.3
586	المجال المغناطيسى للكابلات :	24.4
587	المجال الكهربى للكابلات	24.5
588	قياس شدة المجال الكهربى Electrical field	24.5.1
588	تأثير المجال الكهربى على الأطراف :	24.5.2
589	تأثير المجال الكهربى على ظاهرة WATER TREE :	24.5.3
591	الاختبارات الروتينية:	25
591	الاختبارات الروتينية:	25.1.1
592	الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة):	25.1.2
593	الاختبارات النوعية:	25.1.3

25.2	اختبارات الموقع للكابلات الجديدة والاختبارات أثناء الخدمة.....593
25.2.1	اختبار تحديد الأوجه Phase Checking.....594
25.2.2	اختبار الاستمرارية.....594
25.2.3	اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر.....595
25.2.4	اختبار قياس سعة الكابل (Cable Capacitance).....597
25.2.1	اختبار الغلاف الخارجي DC Sheath Test.....597
25.2.2	اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل.....598
25.2.3	اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني.....599
25.2.4	اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق.....599
25.3	مجموعة اختبارات العازل.....600
25.3.1	اختبار العازل باستخدام الـ Hipot.....602
25.3.2	اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance Test.....603
25.3.3	اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown Test.....603
25.3.4	اختبار مدة تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test.....604
25.3.5	اختبار كفاءة العزل (الـ Tan delta(δ)).....604
25.3.6	مقارنة قيم الاختبارات:.....605
25.3.7	اختبار Partial Discharge Testing: (PD).....606
25.4	اختبارات تحمل العزل للجهد العالي.....607
25.4.1	اختبار الجهد العالي لدوائر 132 ك.ف ، أو أعلى.....607
25.4.2	تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة :.....609
25.4.3	تأثير استخدام الـ HVAC.....610
25.4.4	استخدام تردد منخفض VLF (Very Low Frequency).....611
26613
26.1	الأسباب الأساسية لانهايار الكابلات:.....613
26.1.1	أسباب تتعلق بالكابل نفسه.....613
26.1.2	أسباب تتعلق بالعزل خصوصا.....614
26.1.3	أسباب ميكانيكية.....614
26.1.4	أسباب كيميائية.....614
26.1.5	أسباب تتعلق بسوء طريقة المد.....615
26.1.6	أسباب تتعلق بسوء اللحام.....615
26.2	مراحل اكتشاف الأعطال.....615
26.3	القياس المبدئي لمسافة العطل.....617
26.3.1	جهاز صدى النبضة (الردار) (Pulse Echo).....617
26.3.2	كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo.....618
26.3.3	تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الـ Pulse Echo.....619

622	كيفية حساب المسافة.....	26.3.4
623	مشاكل استخدام الـ TDR:.....	26.3.5
623	استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل.....	26.3.6
625	طريقة قنطرة موري Murray Bridge لقياس مسافة العطل.....	26.3.7
626	التحديد الدقيق لمكان العطل.....	26.4
626	استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator فى تحديد المكان.....	26.4.1
628	سماعات الاستشعار.....	26.4.2
629	استخدام طريقة الـ Arc reflector فى تحديد مكان العطل.....	26.4.3
630	تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي.....	26.4.4
631	سيارات فحص الكابلات.....	26.5
634	خلاصة بعض الخبرات الفنية.....	26.6
638	27
638	مقدمة الفصل:.....	27.1
639	المقصود بالـ Transient Analysis والـ SS- Analysis؟.....	27.1.1
639	مدى الهزات العابرة.....	27.1.2
640	لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الـ Transient؟.....	27.1.3
641	كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الـ Transients؟.....	27.1.4
643	تحرير المصطلحات.....	27.1.5
644	مصدر تغذية الهزات العابرة.....	27.1.6
644	الأنواع المختلفة من الهزات العابرة.....	27.1.7
647	القسم الأول من أنواع الهزات العابرة:.....	
647	الهزات العابرة المسببة لتغير فى شكل الموجة.....	
647	الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها مكثف ومقاومة.....	27.2
648	مفهوم الـ Time Constant, TC.....	27.2.1
649	الهزات عند تطبيق DC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة.....	27.3
650	الهزات عند تطبيق AC SUPPLY على دائرة بها ملف ومقاومة.....	27.4
653	القسم الثانى من أنواع الهزات العابرة.....	
653	الهزات العابرة المسببة لارتفاع فى الجهد.....	
653	ظاهرة ارتفاع الجهد.....	27.5
654	طبيعة الـ Voltage surges.....	27.5.1
654	ماذا نقصد بـ (BIL) Basic Impulse level.....	27.5.2
657	الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية LIGHTNING.....	27.6
657	ما هو البرق؟.....	27.6.1

658	تأثير جهود الأجسام بالبرق	27.6.2
660	طرق الحد من تأثير الصواعق فى شبكات الجهد العالى:	27.6.3
661	الهزات الناتجة عن فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)	27.7
665	طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الـ CB	27.7.1
	CAPACITOR SWITCHING الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات	27.8
	666	
667	ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟	27.8.1
668	ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟	27.8.2
669	الاهتزازات الناتجة عن فصل وتشغيل بعض الأحمال	27.9
671	الهزات العابرة الناتجة عن ظاهرة FERRO RESONANCE	27.10
	وسائل الحماية من الـ VOLTAGE SURGES فى شبكات الجهد المنخفض	27.11
	672	
	القسم الثالث من أنواع الهزات العابرة 674.....	
	الهزات العابرة المسببة لانخفاض فى الجهد 674.....	
674	ظاهرة هبوط الجهد	27.12
674	الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage	27.12.1
675	الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag	27.12.2
676	انخفاض الجهد المؤقت بسبب حالات القصر Short Circuit	27.12.3
	676.....	
677	انخفاض الجهد المؤقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة	27.12.4
678	ظاهرة ارتعاش الجهد Voltage Fluctuation (flicker)	27.12.5
679	تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة	27.12.6
680	وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد (شبكة الجهد المنخفض)	27.12.7
681	استخدام أجهزة الـ Power Conditioners	27.12.8
	684..... 28	
684	ماذا نقصد بالـ STABILITY	28.1
686	دلالات استقرار الشبكة	28.2
686	أهم المصطلحات والتعريفات	28.3
687	مفهوم الـ Rotor Angle Stability	28.3.1
688	مفهوم الـ Frequency Stability	28.3.2
688	مفهوم الـ Voltage Stability	28.3.3
688	صعوبة دراسة موضوع الـ Stability	28.3.4
	النوع الأول من دراسات استقرار الشبكة: 690.....	

690.....	ROTOR ANGLE STABILITY	دراسة الـ	28.4
690.....	Rotor Angle	تعريف زاوية الـ	28.4.1
691.....	Rotor Angle	التحكم فى الـ	28.4.2
691.....	Rotor Angle	تأثيرات ناتجة عن تغير الـ	28.4.3
692.....	Rotor Angle	صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ	28.4.4
692.....	EQUAL AREA CRITERIA	استخدام الـ	28.5
692.....	Equal Area Criteria	مفهوم الـ	28.5.1
694.....	Stability	تأثير وجود خطين متوازيين بين المصدر والحمل على الـ	28.5.2
696.....		تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة	28.5.3
698.....		النوع الثانى من دراسات الاستقرار:	
698.....	FREQUENCY STABILITY	دراسة الـ	28.6
698.....	INERTIA	تأثير الـ على حجم التغير فى التردد	28.7
699.....		المجالات التى يتغير فيه التردد	28.7.1
700.....	POWER DEFICIT	كيف يمكن علاج مشاكل الـ ؟	28.8
701.....		مراحل التحكم فى التردد:	28.8.1
702.....		النوع الثالث من دراسات الاستقرار:	
702.....	VOLTAGE STABILITY	دراسة الـ	28.9
703.....	VOLTAGE STABILITY	أنواع الـ	28.10
703.....	Voltage Collapse	ظاهرة انهيار الجهد الـ	28.10.1
703.....		أساسيات دراسة استقرار الجهد	28.11
705.....		العلاقة بين الجهد و القدرة غير الفعالة	28.12
708.....		العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد (عدم اتزانه)	28.13
709.....		ملحوظات على استقرار الجهد	28.13.1
710.....		طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات	28.14
710.....		أولا فى شبكات الجهد العالى :	28.14.1
711.....		ثانيا : فى الجهد المتوسط والمنخفض	28.14.2
716.....		29	
716.....	HARMONICS		
717.....	HARMONICS	ماهى الـ وكيف تنشأ ؟	29.1
718.....		طبيعة التوافقيات	29.1.1
719.....	Harmonics	لماذا تختلف الـ فى إشارتى الجهد والتيار لنفس الحمل؟	29.1.2
721.....		كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات؟	29.2

722	سمات هامة للتوافقيات.	29.3
724	مصادر توليد الـ HARMONICS :	29.4
724	أجهزة التي تستخدم معدات الـ Power Electronics :	29.4.1
725	مصاييح الفلورسنت:	29.4.2
731	المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" .	29.4.3
732	المشاكل الناتجة عن التوافقيات.	29.5
733	تأثير التوافقيات على المحولات:	29.5.1
733	ما هو الـ K-Factor	29.5.2
734	كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟	29.5.3
735	تأثيرات متنوعة للتوافقيات.	29.5.4
739	ظاهرة الرنين.	29.6
739	خطورة ظاهرة الرنين.	29.6.1
740	رنين التوازي.	29.6.2
741	رنين التوالي.	29.6.3
742	الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربائية:	29.7
742	المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992	29.7.1
745	الحلول المستخدمة لمنع ظهور التوافقيات	29.8
745	أولا :- الـ "Passive Harmonic Filters"	29.8.1
747	ثانيا:- الـ "Active Harmonic Filters"	29.8.2
747	ثالثا : الـ "Compound Harmonic Filters"	29.8.3
	المثال العملى الأول للحد من التوافقيات : HARMONIC	29.9
748	CANCELLATION	
748	فكرة الـ Harmonic Cancellation	29.9.1
748	تطبيق الفكرة.	29.9.2
753	المثال العملي الثانى للحد من التوافقيات	29.10
753	وصف المشكلة.	29.10.1
754	آليات الحل	29.10.2

رَبَابِ الْفَوْه

توليد الطاقة الكهربائية

مقدمة عامة

عملية توليد أو إنتاج الطاقة الكهربائية هي في الحقيقة عملية تحويل للطاقة Energy Conversion من شكل إلى آخر ، فلا يمكن بحال من الأحوال توليد طاقة كهربية من لا شيء ، أو من العدم ، فالطاقة لا تفنى ولا تخلق من عدم كما نص على ذلك مبدأ بقاء الطاقة. وهذه مقدمة ضرورية في بداية هذا الباب ، لاسيما بعد انتشار ظاهرة الاختراعات الوهمية والاكتشافات الخادعة في الصحف ، ومعظمها يدور حول طرق وهمية لتوليد الطاقة الكهربائية. فمن الأهمية بمكان أن نؤكد هنا أنه لا يمكن الحصول على طاقة كهربية إلا من طاقة أخرى من الطاقات الموجودة بالكون .

أهم مصادر الطاقة

مصادر الطاقة المتوفرة نوعان :

1- الوقود الأحفوري Fossil Fuel : هو عبارة عن بقايا الكائنات الحية من نباتات و حيوانات دُفنت عميقا في باطن الأرض منذ سنين طويلة ، و تعرضت إلى درجات حرارة و ضغط مرتفعين جداً ، مما أدى إلى تركيز مادة الكربون فيها و تحويلها إلى وقود أحفوري يتم حرقه في محطات التوليد بعد ذلك للحصول على الطاقة الحرارية التي ستتحول لاحقا إلى طاقة كهربية. و من أهم الأمثلة على الوقود الأحفوري : الفحم الحجري ، والنفط ، والغاز الطبيعي .

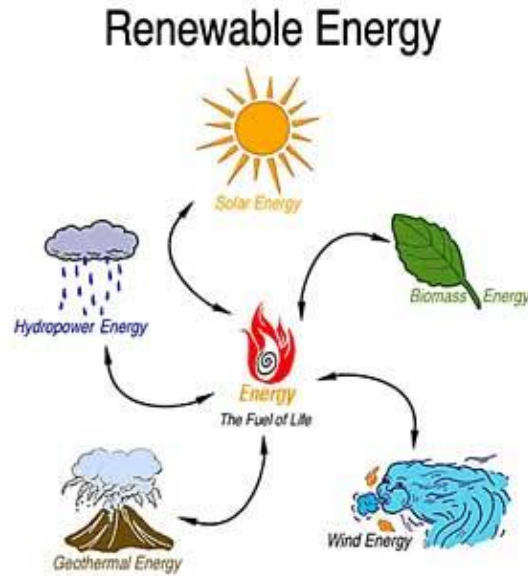


وقد سمي الوقود الأحفوري بهذا الاسم إما لأنه يستخرج من الأحفوريات (والأحفوريات عبارة عن كائنات ماتت منذ ملايين السنين ودُفنت بقاياها في باطن الأرض) ، أو لأنه يحتاج إلى أدوات حفر لن يتم استخراجها من باطن الأرض.

و يشكل الوقود الأحفوري ما نسبته 90% من مجمل الطاقة المستخدمة في حياتنا اليومية. و من أكثر مميزات الوقود الأحفوري التي جعلت منه مصدرا مهما لإنتاج الطاقة ، أنه يمتلك كثافة طاقة عالية ، وأنه سهل النقل و التخزين ، و عندما تتم معالجته بتركيمايا فإننا نحصل منه على أنواع مختلفة من الوقود التي لها استخدامات متعددة .

و بالرغم من كل هذه الفوائد والحسنات للوقود الأحفوري إلا أنه من أكثر الأسباب التي تؤدي إلى دمار البيئة ، فهو من أهم الأسباب التي أدت إلى ظهور ظاهرة (الاحتباس الحراري) ، و تلوث الهواء بفعل الغازات الضارة و المواد المتطايرة الناتجة عن حرقه .

2- الطاقات المتجددة Renewable Energy : مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المستخرجة من باطن الأرض Geothermal والطاقة الحيوية Biomass ، وغيرها .



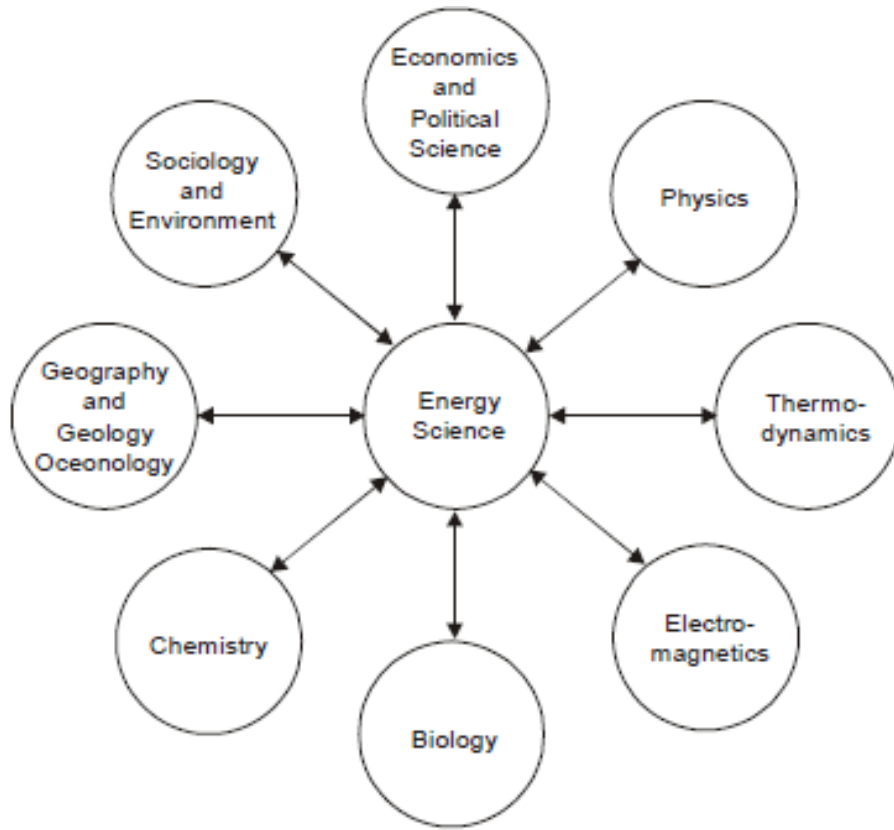
ويمكن أن نقول أن أصل معظم هذه المصادر (سواء التقليدية أو المتجددة) هو الشمس التي تعتبر تقريبا مصدر لكل الطاقات على سطح الأرض ، فالرياح لا تتحرك سوى من ضغط مرتفع لضغط منخفض ، والذي يتحكم في هذه الضغوط هو حرارة الشمس ، والـ Biomass هي طاقة حيوية مخزنة في أوراق وأغصان النباتات يتم حرقها للحصول على طاقة حرارية لتوليد الكهرباء ، وقس على ذلك باقى الطاقات مثل المد والجزر ، وطاقة الأمواج وطاقة باطن الأرض إلخ . كما أن الوقود الأحفوري كما ذكرنا يعود أصله إلى النبات ، وأصل الطاقة التي وضعت في النبات هي الشمس ، ومن ثم ستجد دائما هناك علاقة مباشرة أو غير مباشرة بين مصدر الطاقة والشمس.

3- الطاقة النووية: ربما يشذ عن القاعدة السابقة أنواع محددة مثل الطاقة النووية ، فهذه لا علاقة لها بالشمس.

علم الطاقة

فى رأيي أن علم الطاقة هو أم كل العلوم ، فالباحث فى علم الطاقة (وخاصة توليد الطاقة الكهربائية) سيحتاج إلى دراسة علوم متنوعة وكثيرة كما يبدو واضحا فى الشكل التالى الذى يثبت أن هذا العلم له علاقات تبادلية مع خلاصة العديد من العلوم. وهذا منطقى ، فالإنسان منذ بدء الخليقة يبحث عن الطاقة ، منذ زمن الإنسان الأول الذى

اكتشف النار ، إلى إنسان العصر الحديث الذى اكتشف المصادر الجديدة والمتجددة لتوليد الطاقة ، فكان البحث عن الطاقة محفزاً لنشوء علوم كثيرة من أجل استخراج وتجويد وتحسين وتعظيم الاستفادة من هذه الطاقات.



وحدات قياس الطاقة

بما أن توليد الطاقة الكهربائية هي عملية من عمليات تحويل الطاقة فيجب أن نشير هنا إلى وحدات قياس الطاقة. فالطاقة عموماً (سواء ميكانيكية أو كهربية أو حرارية) تقاس بوحدة الجول Joule .

ففي حالة الطاقة الميكانيكية

يمكن التعبير عن الطاقة الميكانيكية بثلاث صور مختلفة (كلها صور لنفس الطاقة ولكن بتحويلات مختلفة):

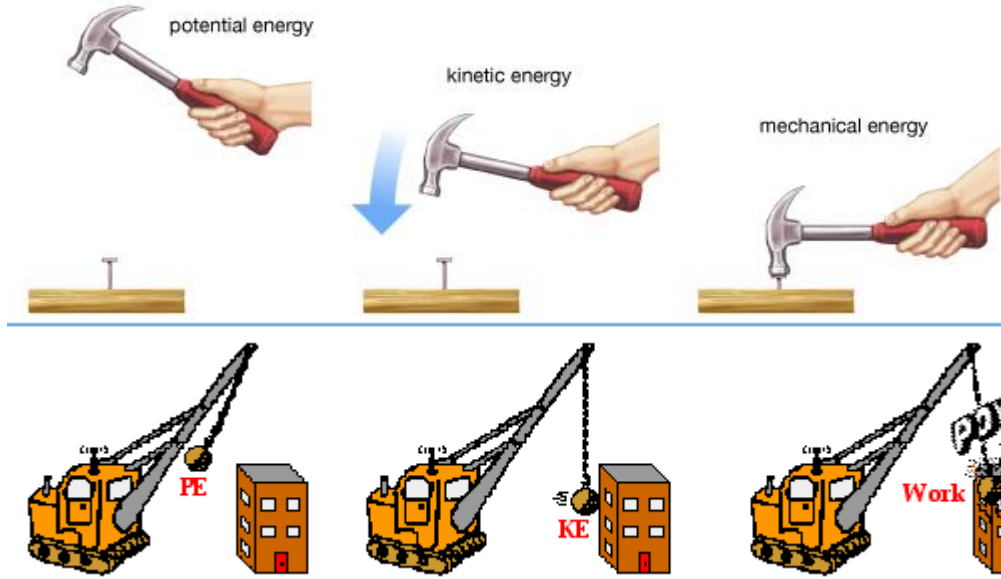
• طاقة الوضع, Potential Energy: $PE = \text{mass} \times \text{gravity acceleration} \times \text{height}$

• وطاقة الحركة, Kinetic Energy: $KE = 0.5 \text{ mass} \times \text{velocity}^2$

• والشغل, Work : وهو الانجاز النهائى المطلوب من هذه الطاقة الميكانيكية ، وهو عبارة عن

تحريك شئ ما لمسافة معينة ، $\text{Work} = \text{Force} \times \text{distance}$

وجميعها يقاس بوحدة الجول. والشكل التالى يمثل ثلاث صور للطاقة الميكانيكية وصور مختلفة للشغل.



والجول يعبر عن كمية الشغل Work الذى تبذله قوة قدرها واحد نيوتن حين تدفع جسما لمسافة قدرها متر واحد:
 $Work = Mechanical\ Energy\ (J) = Force\ (N) \times Distance\ (mt) = Joules$

وفي حالة الطاقة الكهربائية

فإن نفس الوحدة (الجول) تمثل الطاقة الكهربائية المستهلكة فى الثانية داخل أى جهاز كهربى له قدرة Power
 تساوى واحد وات:

$$Electrical\ Energy = Power\ (watt) \times time\ (sec) = Volt \times Amp \times Sec = Joules$$

وحيث أن هذه الوحدة تمثل كمية ضئيلة من الطاقة فإننا يمكن أن نستخدم وحدات أكبر مثل kWatt-Hour

$$1\ (kWH) = 1000 \times 60 \times 60 = 36 \times 10^5\ Joule$$

$$1\ W.H = 3600\ Joule$$

ملحوظة : الجول يعادل أيضا كهربيا:

- الطاقة التي تكتسبها شحنة كهربية مقدارها 1 كولوم عند تحركها بين فرق جهد مقداره 1 فولت.
- الطاقة اللازمة لتسيير تيار كهربائي قدره 1 أمبير بين فرق جهد قدره 1 فولت مدة 1 ثانية

وأصل الطاقة الكهربائية يمكن أن يكون كيميائيا كما فى البطاريات ، أو حراريا ميكانيكيا كما فى محطات التوليد ، أو ضوئيا كما فى الخلايا الشمسية . والمهم هنا التأكيد على أن الطاقة الكهربائية لا تأتى إلا من طاقة أخرى.

أما في حالة الطاقة الحرارية

فإن الطاقة تقاس في الغالب بوحدة تسمى كالورى Calorie (وفى النظام الإنجليزى تقاس بوحدة أخرى هى الـ British Thermal Unit, BTU) ، والجول يمثل الطاقة المستهلكة Q لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة .

$$\text{Amount of Heat} = Q = m(\text{kg}) \times c(\text{Specific Heat const}) \times \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

والعلاقة بين الجول والكالورى هى :

$$1 \text{ Calorie} = 4.18 \text{ Joule}$$

علما بأن درجات الحرارة يمكن أن يعبر عنها بثلاث طرق مختلفة :

- الطريقة الأولى باستخدام درجة الحرارة المئوية .
- الطريقة الثانية باستخدام درجة الحرارة المطلقة أو مقياس كلفن K_0 ، (Absolute Temperature) ، ونحصل عليها بإضافة 273 إلى الدرجة المئوية.
- والطريقة الثالثة هى قياس الحرارة بالفهرنهايت (الأكثر استخداما فى أمريكا) ، والمعادلة التالية تعبر عن طريقة التحويل من درجة مئوية إلى فهرنهايت.

$$F = 32 + 1.8 \text{ times } ^{\circ}\text{C}$$

تصنيف محطات التوليد الكهربائية

الجزء الأكبر من هذا الباب سيكون حول دراسة محطات توليد الكهرباء بأنواعها ، وجزء آخر حول ربط هذه المحطات ببعضها . وعموما يمكن تصنيف محطات التوليد إلى نوعين : محطات تقليدية ، ومحطات الطاقة المتجددة.

ومن أشهر أنواع محطات التوليد التقليدية :

Thermal Power Stations	○	محطات التوليد البخارية
Gas Turbine & Combined cycle	○	المحطات الغازية والدورة المركبة
Diesel Power Stations	○	محطات توليد الديزل
Nuclear Power Stations	○	محطات التوليد النووية
Hydroelectric Power stations	○	محطات التوليد المائية

ومن أشهر أنواع محطات الطاقة الجديدة والمتجددة :

Wind Power stations	▪	محطات الرياح
Solar Power stations	▪	محطات الطاقة الشمسية
Tidal Power stations	▪	محطات المد والجزر
Geothermal Power Stations	▪	محطات طاقة باطن الأرض
Biomass Power Stations	▪	محطات الطاقة الحيوية
Wave Power stations	▪	محطات موجات البحر
Ocean Thermal Energy Conversion	▪	تحويل طاقة المحيط الحرارية
Fuel Cells Power Plants	▪	محطات خلايا الوقود

فصول هذا الباب

فصول هذا الباب تسير على النحو التالي:

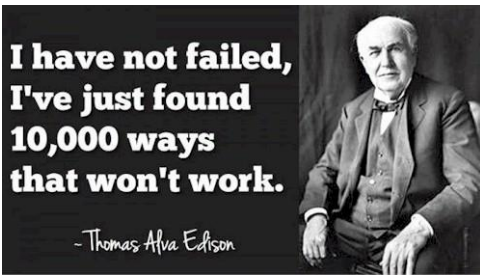
- الفصل الأول : يعرض مفهوم الشبكة القومية الموحدة ، وتفاصيل ربط وحدات التوليد معا والتحكم فيها.
- الفصل الثاني : المحطات الحرارية بأنواعها المختلفة (البخارية - الغازية - المركبة)
- الفصل الثالث : شرح تفصيلي للقسم الكهربى بمحطات التوليد عموما
- الفصل الرابع : المحطات النووية
- الفصل الخامس : المحطات المائية
- الفصل السادس : بعض المحطات المعتمدة على الطاقة الغير تقليدية (الشمسية - طاقة باطن الأرض - المد والجزر ، ومحطات طاقة الرياح) .
- ملحق الباب الأول : دراسة عن اقتصاديات محطات التوليد ، وأسعار إنشائها.

1

الشبكات الكهربائية الموحدة

1.1 الشبكات الكهربائية الموحدة

أنشأ توماس إيدسون أول محطة لتوليد الكهرباء في العالم في نيويورك بأمريكا في 1882 ، وقد نجح أخيرا ، بعد محاولات عديدة فاشلة ، في توليد تيار كهربى مستمر . وهو صاحب العبارة الأشهر : "أنا لم أفلح ولكنى نجحت فى اكتشاف عشرة آلاف طريقة فاشلة".



وكانت مصر أول دولة عربية دخلتها الكهرباء على شكل مولدات ديزل (وليس محطات توليد) فى 1863 فى عهد الخديوى اسماعيل ، لكن أول محطة توليد كهربية عمومية كانت فى 1895 زمن الاحتلال الانجليزى .

أما الدول العربية ، فالعراق عرف الكهرباء فى 1917 خلال فترة الاحتلال الإنجليزى أيضا ، وكانت بغداد مضاءة بالكامل فى 1928 ، أما السعودية فقد بدأت باستخدام مولدات الديزل فى أوائل العشرينات .

واستخدمت الكهرباء ضمن شبكة كهربية عمومية فى الكويت فى عام 1934م بعد أن كانت لسنوات تستخدم مولدات الديزل فى استخدامات محدودة ، و فى عام 1951م تم إنشاء أول محطة توليد بمنطقة الشويخ ، وكان جهد الشبكة الكهربائية حينها لا يتجاوز (11000) فولت ، ومع التطور الزمنى أصبح الآن بالكويت رغم صغر مساحتها شبكة قوية بقدرة تتجاوز 13 جيجاوات وبجهد يصل إلى 400 kV .

وأول شبكة كهربية عربية موحدة تضم مستويات مختلفة من الجهود ووحدات توليد متعددة ومتنوعة كانت فى مصر ، فقبل إنشاء وزارة الطاقة الكهربائية فى مصر عام 1964 كان هناك العديد من الشركات والهيئات المسؤولة عن توليد الكهرباء . وكانت بعض أنواع التيارات المستخدمة فى مجال التوزيع من النوع الـ DC ، والبعض الآخر كان AC بنوعيه (1-phase) و (3-phase) . بل كان البعض منهم يعمل على تردد (40Hz) ، والبعض الآخر على تردد (50Hz) . وكان جهد التوزيع فى بعض المناطق مثل الاسكندرية (110 V) ، وفى مناطق أخرى كان الجهد 220V . وبالتالي كان لابد قبل إنشاء شبكة الكهرباء الموحدة التى بإمكانها ربط جميع الشبكات مع بعضها البعض أن يتم أولا

توحيد وتنسيق الترددات والجهود التي تأتي من محطات توليد الكهرباء المختلفة ، وكذلك توحيد وتنسيق الجهود المستخدمة في النقل والتوزيع.

والآن ، فإن أكبر شبكة كهربية موحدة في الشرق الأوسط هي الشبكة السعودية ، حيث بلغت قدرات التوليد المتاحة من الكهرباء في السعودية 65506 ميغاوات بنهاية 2014 ، وبذلك تعد السعودية أكبر منتج للطاقة الكهربائية في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا (تمتلك السعودية أكثر من 50 محطة توليد بأنواع وقود متنوعة ، ويشكل إنتاج المملكة أكثر من 25% من إنتاج 18 دولة عربية مجتمعة) .

بينما تأتي مصر في المرتبة الثانية من حيث قدرات التوليد بالشبكة الموحدة ، حيث يبلغ إجمالي القدرة المركبة بها حوالي 36000 ميغاوات (2016) ، وتقوم بإنتاج ونقل وتوزيع الطاقة على مستويات الجهود المختلفة (400 ، 500 ، 220 ، 132 ، 66 ، 33 ، 22 ، 11 ك فولت) من خلال محطات التوليد المختلفة بالشبكة (بخارية ، غازية ، مركبة ، مائية ، رياح ، شمسية). وتأتي بعد ذلك الإمارات والعراق والكويت والجزائر على الترتيب ثم بقية الدول العربية.

1.1.1 أهمية الشبكات الكهربائية الموحدة

في كل دول العالم يتم ربط محطات التوليد داخل كل دولة معا بشبكة نقل جهد عالي ، بحيث تصبح جميع المولدات تصب في شبكة واحدة ، وجميع الأحمال تأخذ من نفس هذه الشبكة ، وبالتالي فأنت في مصر مثلاً عندما تقول مثلاً أن الكهرباء في بيتي تأتي من محطة شبرا الخيمة لأنك تسكن بجوار هذه المحطة فهذا خطأ ، والصحيح أن الكهرباء تأتيك من الشبكة الموحدة .

والهدف واضح من هذا الأسلوب في ربط محطات التوليد معا ، فلو كانت كل محطة مسئولة عن مدينة معينة ، فإن خروج هذه المحطة من الخدمة لأي سبب يعني فقد الطاقة الكهربائية بالكامل في هذه المدينة ، بينما في حال ربط المحطات معا ، فإن خروج وحدة توليد يمكن في معظم الأحيان تعويضها بسهولة من الاحتياطي الموجود في بقية المحطات المتصلة بالشبكة.

وتتمثل الفائدة الأساسية لربط عدة شبكات كهربية معا في تقليل القدرة الاحتياطية المركبة في كل شبكة ، وبالتالي إلى تخفيض الاستثمارات التي تنفق لبناء محطات جديدة لتلبية الطلب ، دون المساس بدرجة الأمان والاعتمادية في الشبكات المرتبطة. ويؤدي الربط إلى التقليل من الاحتياطي spinning reserve الذي سنتحدث عنه لاحقاً ، ويهدف الربط أيضاً إلى الاستفادة من إقامة محطات التوليد في المواقع المناسبة لها ، بحيث تكون أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية نتيجة مثلاً لتوفر وقود رخيص فائض صعب التصدير أو صعب التخزين في إحدى الدول المرتبطة .

ويهدف الربط أيضاً إلى التقليل من تلوث البيئة ، فالجدير بالملاحظة أن معظم محطات التوليد الجديدة في أوروبا على سبيل المثال تنشأ في شرق أوروبا الفقير وليس في غربها الغني الذي يريد الكهرباء دون تلوث .

1.1.2 الربط الكهربى بين الدول العربية

وإدراكاً لهذه الفوائد ، فقد قام عدد محدود من الدول العربية منذ أوائل الخمسينيات بربط شبكاتهم الكهربائية معاً. ودول المغرب العربي كان لها سبق فى ذلك ، فعلى سبيل المثال ، تم ربط الجزائر بتونس بدءاً من عام 1952 بخط ربط على جهد 90 ك.ف. وذلك لأغراض الطوارئ فقط ، مثل حدوث أعطال فنية أو عند ارتفاع الطلب بصورة مفاجئة فى إحدى الشبكات يمنعها من توفير الطاقة للأحمال الموجودة على شبكتها. وتم ربط المغرب والجزائر بخط ربط على جهد 220 ك.ف. فى عام 1979. وبالإضافة إلى الربط القائم بين الجزائر والمغرب على جهد 220 ك.ف. ، قامت الدولتان أيضاً بربط شبكات الكهرباء فيهما ، على جهد 400 ك.ف. ، وذلك من خلال خط هوائي بقدرة حوالي 900 MW. وقد دخل هذا الخط فى الخدمة عام 2009.

أما دول الخليج فإنهم يرتبطون معاً بشبكة واحدة أيضاً ، ويوضح الشكل 1-1 المخطط العام لشبكة الربط لدول مجلس التعاون الخليجي. وقد نفذ مشروع الربط على ثلاث مراحل ، بحيث تم فى المرحلة الأولى ربط محطة الزور فى الكويت بمحطة الفاضلي فى المملكة العربية السعودية ، وبمحطة الجسرة فى البحرين ، ومحطة الدوحة الجنوبية فى قطر ، كل ذلك على جهد 400 ك.ف. وتشكل هذه الخطوط الجزء الشمالي من الربط. أما فى المرحلة الثانية ، فتم ربط شبكات الإمارات وعمان ، التى تشكل الجزء الجنوبي. وفى المرحلة الثالثة ، يتم ربط الجزء الشمالي بالجزء الجنوبي.

(ملحوظة: لا توجد خطوط HVDC فى أى جزء من الشبكة لأن الشبكة كلها تردد 50HZ ، رغم أن هناك اختلاف فى التردد بين السعودية وبقية الدول ، إلا أن ربط السعودية بالشبكة يتم داخل محطة الفاضلي نفسها بواسطة Back to Back Inverter/Converter sets بدون أى مسافة بينهما).

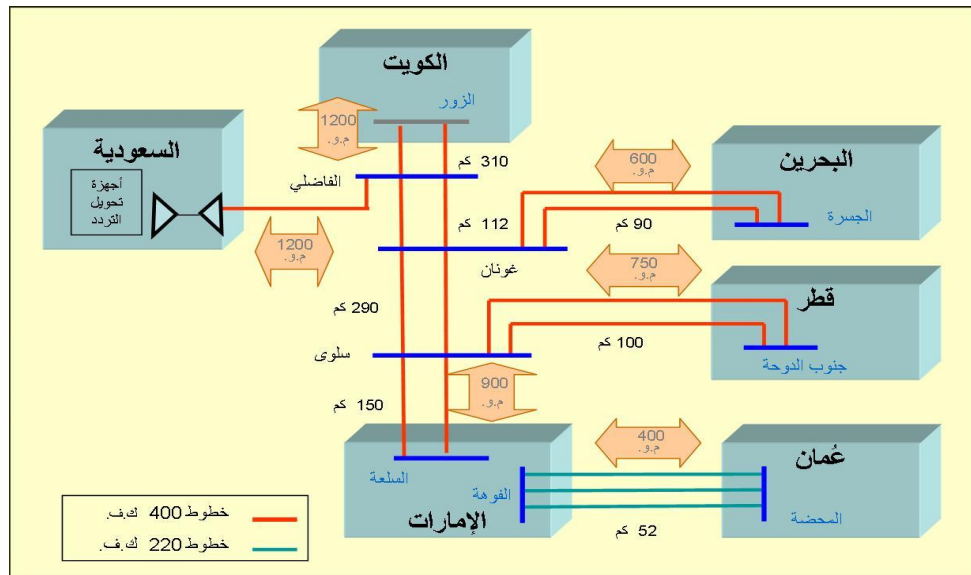


Figure 1-1 شبكة الربط الخليجي الموحدة

وتوجد حاليا شبكة ربط للكهرباء في مصر والأردن وسوريا ولبنان وليبيا وفلسطين (تم الربط بين الشبكة الكهربائية الأردنية مع الشبكة الفلسطينية من خلال مغذي 33 ك.ف من محطة تحويل السويمة بالأردن إلى أريحا بفلسطين ، وهناك ربط كهربائي محدود بين غزة مع مصر) ، وكان يفترض ضم العراق وتركيا ولكن حالت الظروف السياسية دون ذلك ، والشكل 1-2 يمثل المخطط العام المفترض لمشروع الربط بين هذه الثمانية دول.

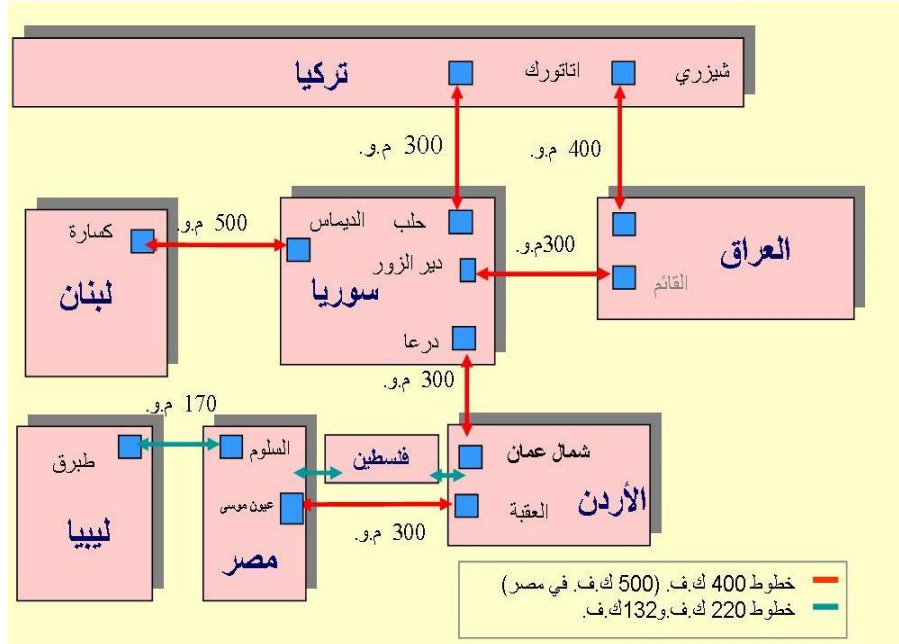


Figure 1-2 شبكة الربط الثماني

وتفصيليا ، ترتبط مصر كهربيا بالأردن منذ عام 1998 ، عن طريق خط هوائي جهد 500 kV يعبر إلى سيناء من السويس ويمتد حتي الحدود المصرية في طابا ، وداخل محطة طابا يوجد محول بقدرة 750 ميجا ، وجهد 400/500 kV ، ثم تتصل في المرحلة الأخيرة بشبكة الأردن من خلال كابل بحري بطول 13.3 كم لعبور خليج العقبة على عمق 850 م إلى نقطة الربط بالشبكة الأردنية على جهد 400 kV ، وهذا الكابل البحري مكون من أربعة فازات (ثلاثة في الخدمة والرابع احتياطي يستخدم عند خروج أي Phase لدواعي الصيانة أو بسبب عطل) . وتتضمن منظومة الربط أيضا محطات محولات بكل من السويس و طابا.

ملحوظة : الأردن مرتبط بسوريا ، وسوريا مرتبطة بلبنان ، وهذا يعني أن جميع هذه الدول مرتبطة بمصر .

كما تم تنفيذ الربط أيضا بين مصر و ليبيا على جهد 220 KV ، و تم التشغيل في 28 مايو 1998 ، و كان بين محطة مطروح في مصر و محطة طبرق في ليبيا. والجزء الخاص بالربط مع ليبيا يبدو على شاشات مركز التحكم القومي كما في الشكل 1-3 .

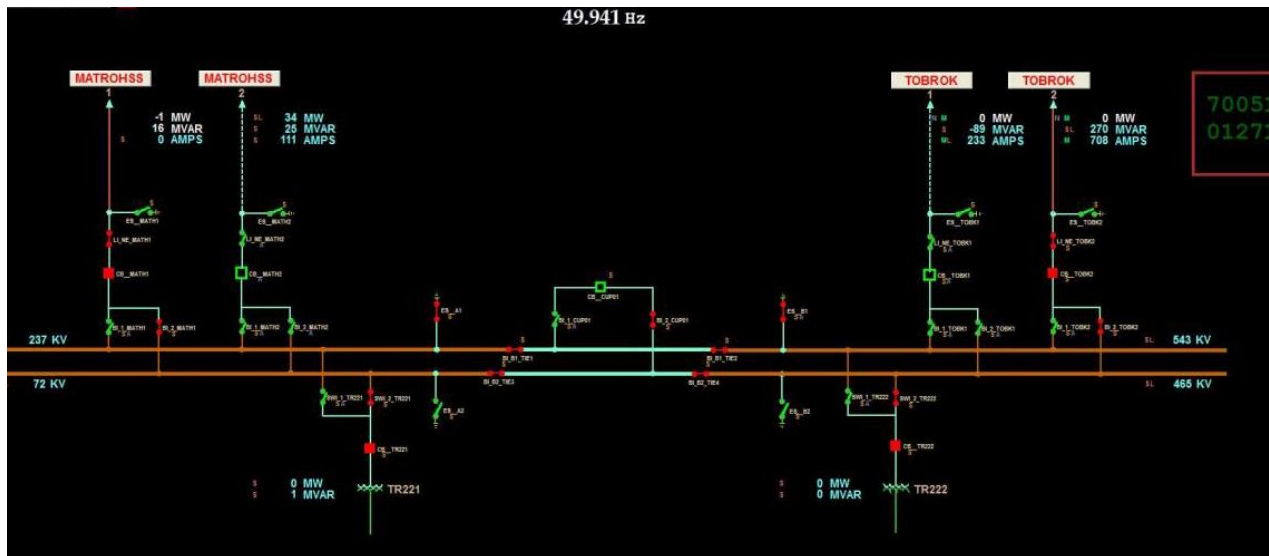


Figure 1-3 الربط مع ليبيا على شاشات مركز التحكم

1.1.3 أهم ميزات الربط الكهربى

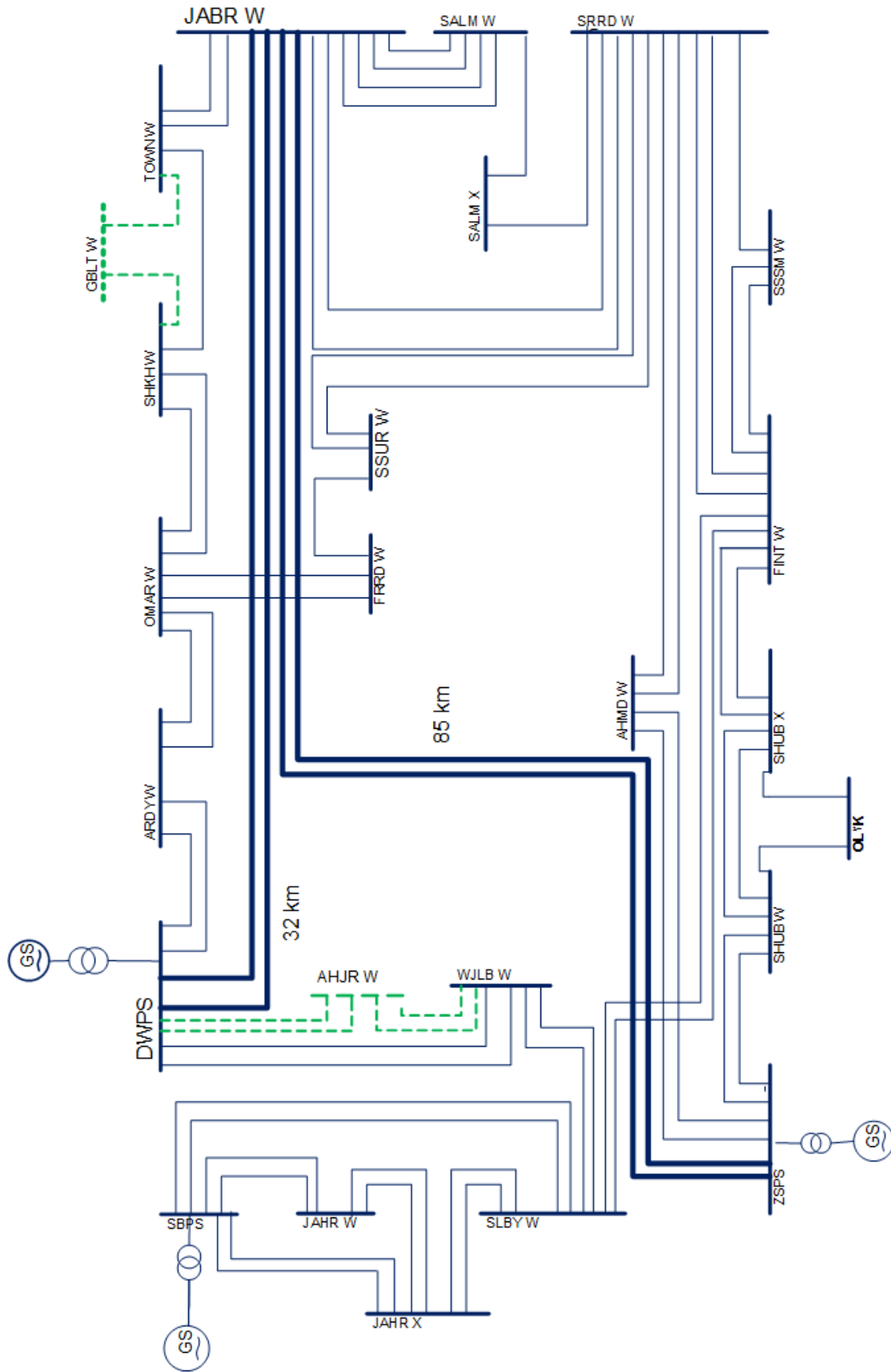
الميزة الأساسية لهذا الربط يظهر بقوة عند حالات الـ Blackout (الإفلام التام) حيث يفيد هذا الربط فى عملية الـ Restoration (استعادة الطاقة) . وأحيانا تظهر أهميتها فى تبادل الطاقة وقت الذروة ، لكن هذه الميزة الأخيرة لا تظهر إلا إذا كانت الدول المشتركة متباعدة فى خطوط الطول حتى لا تحدث الذروة فيها فى وقت واحد فتصعب عملية التبادل (مالم تكن الدولة لديها إنتاج كبير يفوق استهلاكها الأقصى ، كما هو الحال مثلا فى قطر التى لديها حوالى 3 جيجاوات فائض إنتاج وهى أكبر دولة عربية فى فائض الإنتاج) ، أما فى الظروف العادية فحجم التبادل بين الدول محدود كما يظهر من الجدول 1-1 الذى يمثل الطاقة المباعة والواردة لمصر من ليبيا والأردن وسوريا ولبنان.

Table 1-1 القدرة المتبادلة بين دول الربط

خط الربط المصري الأردني			خط الربط المصري الليبي	البيان
400			220	جهد الربط (ك.ف)
لبنان	سوريا	الأردن	ليبيا	دول الربط
82	220	1277	100	الطاقة المباعة (صادرة) (ج.و.س)
-	2	26	64	الطاقة الواردة (ج.و.س)

1.1.4 نماذج للشبكات الموحدة

الأشكال التالية تمثل نماذج لشبكات بعض الدول (هذه الأشكال تحتاج لتحديث لأن معظم الدول تتطور فيها شبكات الكهرباء سنوياً). فالشكل 1-4 يمثل جزءاً من شبكة الـ 300kV بالكويت ، ويلى ذلك الشكل 1-5 الذى يمثل أجزاء من الشبكة السعودية ثم الشبكة الأردنية ، ثم الشكل 1-6 وفيه الخطوط العامة لشبكة الولايات المتحدة الأمريكية ، وأخيراً الشكل 1-7 والذى يمثل الشبكة المصرية (جهد 500 kV وجهد 220 kV) التى ندرسها بعد ذلك بشئ من التفصيل.



جزء من شبكة الكويت Figure 1-4

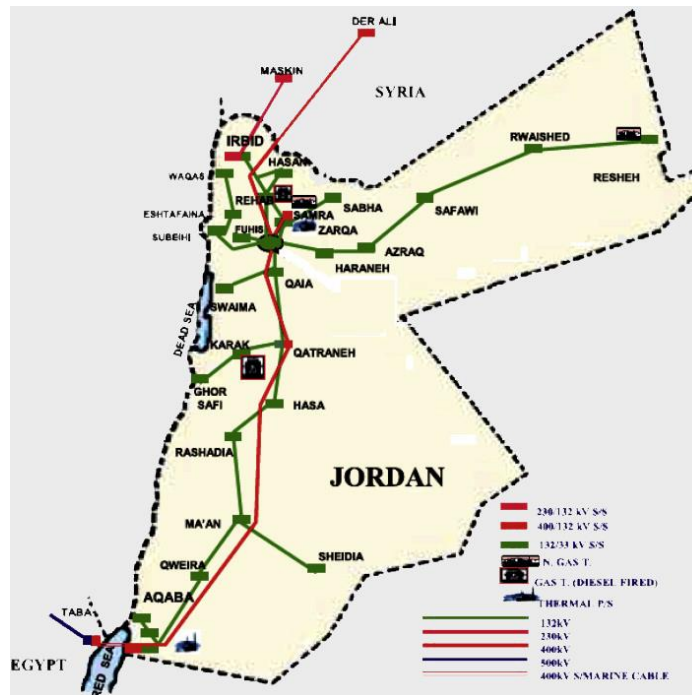
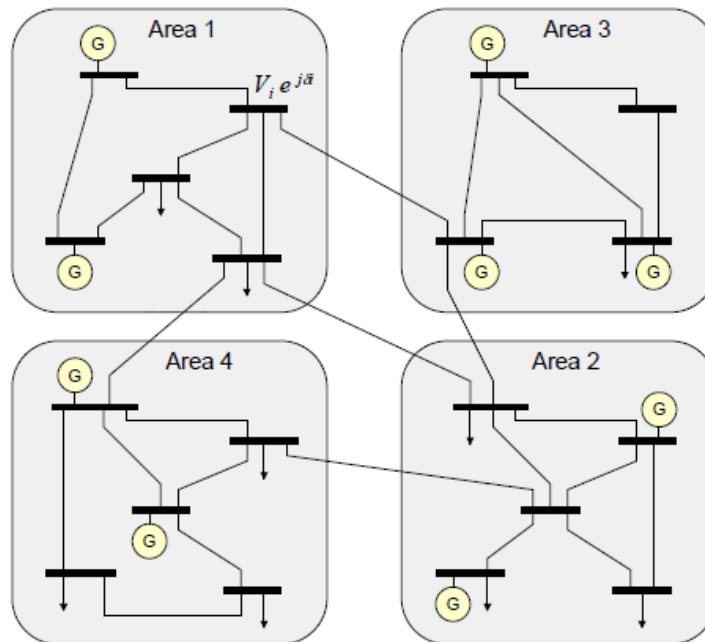
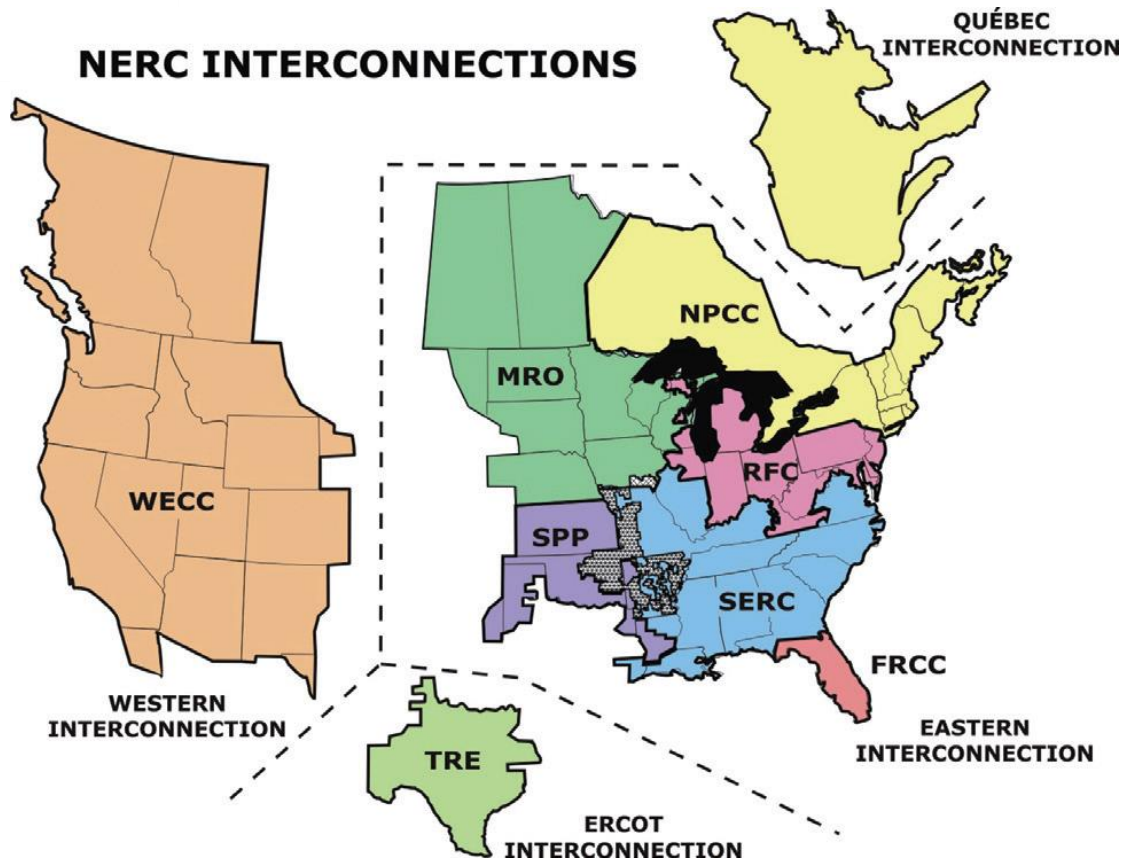


Figure 1-5 أجزاء من الشبكة السعودية والشبكة الأردنية

لاحظ في الشبكة السعودية أنها مقسمة إلى عدة شبكات موحدة مرتبطة معا ، فكلما تضخمت الشبكة صعب أن يقوم مركز واحد بمتابعتها كوحدة واحدة ، ولكن بالطبع يوجد ربط بين هذه الشبكات المنفصلة.

وهذه النقطة تظهر بوضوح أكثر في شبكة أمريكا الشمالية (شرق أمريكا و كندا) وهما معا يمثلان أكبر شبكة كهربية موحدة في العالم ، مع ملاحظة أنها في الواقع تتكون من أربع شبكات شبه معزولة عن بعضها ، وأقول ذلك لأنه بالفعل هناك خطوط ربط HVDC بين الشبكات الأربعة ، كما في الشكل 1-6.

ملحوظة : في الفصل السابع سنتعرف على السبب في استخدام الـ HVDC في الربط بين هذه الشبكات وليس باستخدام HVAC .



مخطط الشبكة الموحدة بأمريكا Figure 1-6

في الشكل 1-7 نجد الشبكة الموحدة في مصر ، والتي ندرسها هنا بشئ من التفصيل.

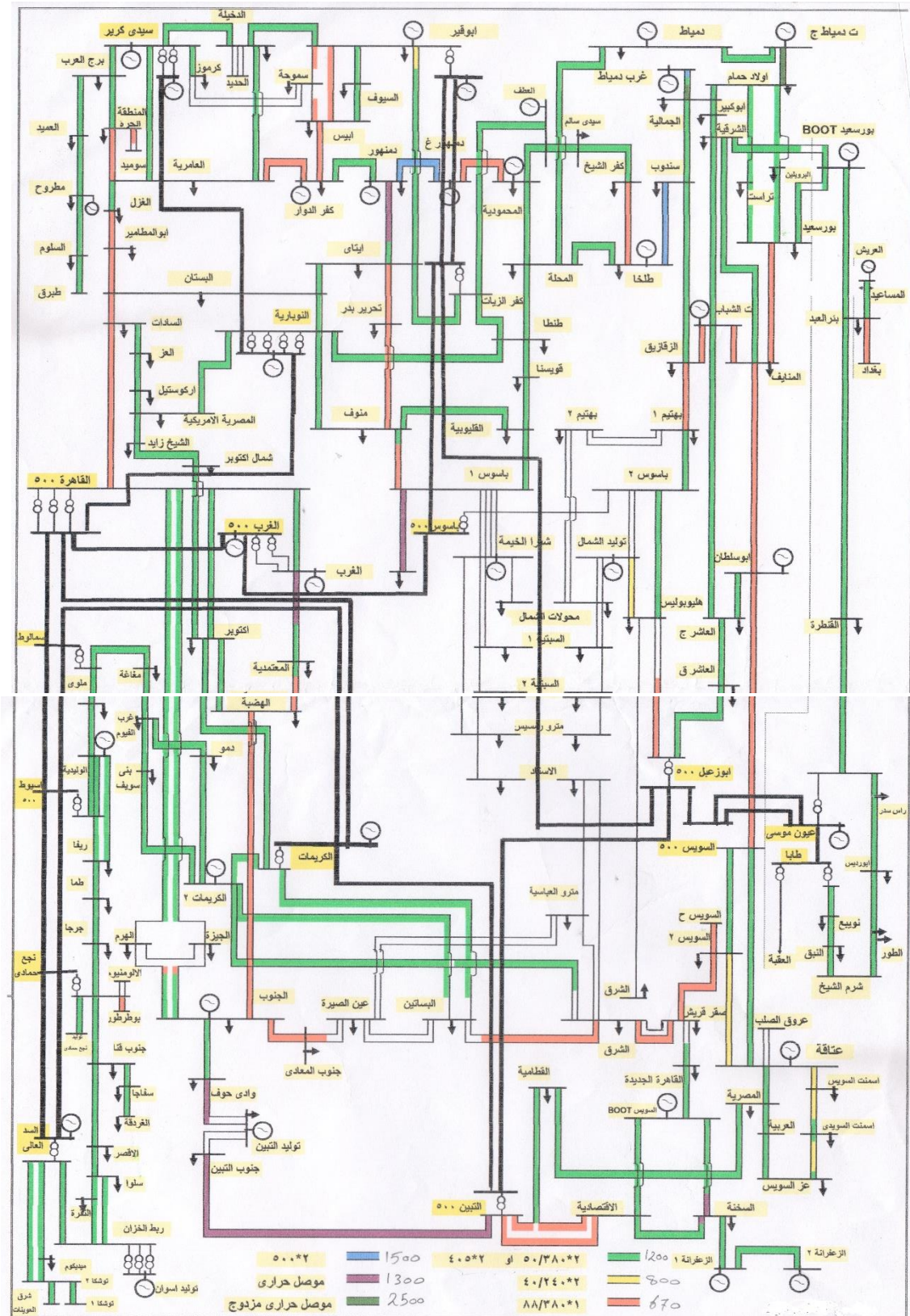


Figure 1-7 جزء من الشبكة الموحدة بمصر جهد 500 وجهد 220 ك ف

والشكل 8-1 يمثل أماكن المحطات جغرافيا في مصر ومسارات خطوط الجهد العالي.

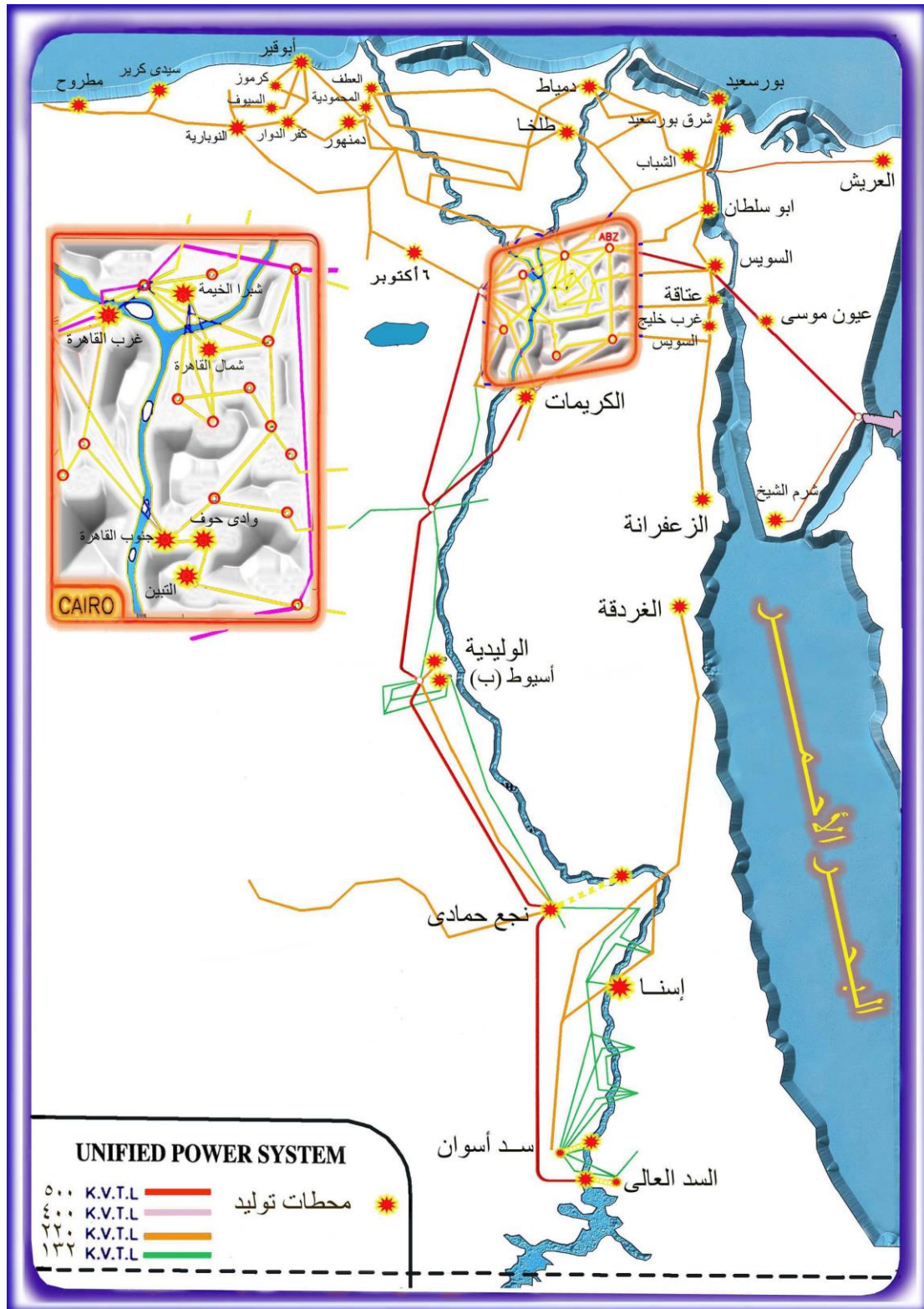


Figure 1-8 التوزيع الجغرافي لمحطات التوليد في مصر

لاحظ في الشبكة المصرية أن جميع محطات التوليد فيها (34 محطة في مصر) مرتبطة جميعا معا بخطوط نقل كما في الشكل 1-7 ، وتظهر بعض محطات التوليد متصلة بالخطوط جهد 500kV (الخط الأسود العريض في الشكل) ، والبعض الآخر بالخطوط جهد 220kV (خطان رفيعان).

ملحوظة:

لا يوجد سوى عدد قليل من محطات التوليد التي تتصل مباشرة بجهد 66 kV في مصر مثل وادي حوف - الشباب - السيوف - مرسى مطروح - الكريمت الشمسية ، وهناك عدد محدود جدا من محطات التوليد الصغيرة التي تتصل على شبكة الـ 11kV مثل كرموز - سمالوط - الشرق - البساتين ، واستخدامهم الأساسي لتحسين انتظام الجهد في شبكة التوزيع.

1.1.5 ملاحظات على الشبكة الموحدة المصرية

- 1- معظم الطاقة الكهربائية المولدة في مصر تأتي من الشمال (أبو قير والنوبارية وسيدى كرير ودمياط والمحمودية إلخ) بينما تعتبر القاهرة ، وهي العاصمة ، بمثابة مصب لمعظم الطاقة المولدة.
- 2- أكثر المناطق تأمينا هي وسط البلد (داخل القاهرة) حيث كل محطة محولات Substation يأتيها التغذية من جهتين مختلفتين.
- 3- مناطق الصعيد الأكثر فقرا في الطاقة ، وقبل افتتاح محطة الوليدية كانت المحطات المائية في أقصى الجنوب تمثل المصدر الوحيد للتغذية في هذه المناطق ، وكان هذا يمثل عيبا كبيرا في الشبكة ، وقد بدأ علاج ذلك جزئيا ، لاسيما بعد افتتاح محطة أسيوط الجديدة.

1.1.6 الفقد في الشبكات

قد يسأل سائل : أليس من المتوقع أن يكون هناك فقد كبير في القدرة الكهربائية نتيجة طول الخطوط وامتدادها لربط هذا العدد الكبير من محطات التوليد ؟ والإجابة نعم هناك فقد في الطاقة لكن هناك أيضا إجراءات لتخفيض هذا الفقد ، منها بالطبع استخدام الجهود الفائقة في النقل ، فكلما زاد الجهد انخفض التيار ، وانخفض الفقد .

وأقل دولة عربية في نسبة الفقد في الطاقة حسب إحصائيات البنك الدولي هي قطر (2% فقط) ، بينما تبلغ نسبة الفقد في الطاقة في مصر حوالي 11% ، وهي نسبة مرتفعة جدا مقارنة بالمعدل في كثير من الدول الذي يدور حول 5% كما في الشكل 1-9.

ويرجع السبب في ارتفاع نسبة الفقد إلى عوامل فنية مثل الـ Power Losses لاسيما في خطوط ومحولات التوزيع ، وكذلك تأثير كفاءة المعدات وقدم المحطات ، ولكن النسبة الأكبر منه ترجع (لاسيما في حالة النسب المرتفعة جدا) إلى

عوامل غير فنية مثل السرقات والعشوائيات وأخطاء العدادات وعدم التحصيل ، إلخ. وبسبب هذه العوامل غير الفنية تصل نسبة الفقد في دول أخرى إلى أكثر من 40 % .

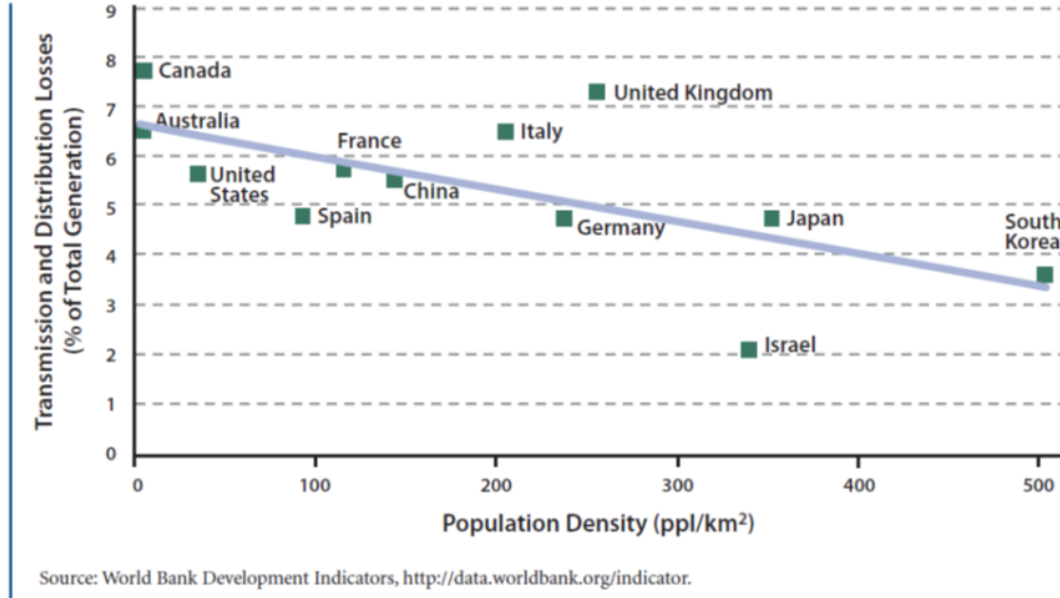


Figure 1-9 نسب الفقد في القدرة في شبكات بعض الدول

1.1.7 هل كل المولدات المتصلة بالشبكة تعمل طوال الوقت؟

بالطبع سيتوقف ذلك على حجم الحمل المتصل ، حيث يقوم مركز التحكم يوميا بعمل دراسة للحمل المتوقع ، وتحديد عدد وحدات التوليد وعدد المحطات الكافية لتغذية هذا الحمل المتوقع ، ووضع هذه المحطات في الخدمة حتى لو كانت تعمل No Load ، بحيث إذا زاد الحمل فجأة يجد الشبكة جاهزة لتغذيته لحظيا ، وهذا ما يعرف بالـ Hot Spinning Reserve ، وسمى كذلك لأنه يمثل قدرة توليدية in operation لكنها ليست in service ، أى ليست في الخدمة رغم أنها تدور ، علما بأن اختيار عدد ونوعية المحطات يخضع لمتغيرات عديدة أهمها :

1- الحمل المتوقع هذا اليوم ، وهذا يتوقف على تسجيلات الأحمال في اليوم السابق وقيمة الحمل المقابل في نفس هذا اليوم من الأسبوع الماضى (للتشابه الأنشطة) وكذلك بيانات الأرصاد التي تصل لمركز التحكم يوميا.

2- تكلفة التشغيل ، فالمحطات التي تنتج kWh رخيصة تكون دائما مخصصة لتغذية ما يعرف بالـ Base Load وهو الحد الأدنى من الأحمال المتصلة بصفة دائمة بالشبكة على مدار الـ 24 ساعة يوميا وطوال السنة مثل المحطات الحرارية والنووية. تستخدم أيضا في تغذية الـ Base Load المحطات التي تحتاج لوقت طويل حتى تبدأ في إنتاج الطاقة .

3- سرعة الاستجابة ، فالمحطات الغازية والمائية تعرف بسرعة دخولها في الخدمة (عدة دقائق) فهذه دائما تخصص لتغذية أحمال الـ Peak Load وهي الأحمال التي تدخل للخدمة وقت الذروة لعدة ساعات وربما

لعدة دقائق فقط. مع ملاحظة أن الوحدات المائية هي الأسرع على الإطلاق في الدخول للخدمة ، فهي تحتاج فقط إلى 3 أو 4 دقائق ، أما الغازية فتحتاج حوالي 15 إلى 30 دقيقة حتى تعطى قدرتها كاملة . وعلى سبيل المثال ، فعند حدوث أى تغير في التردد نتيجة دخول أحمال مفاجئة (مثل الأحمال الصناعية) فإن المركز القومى للتحكم فى الطاقة (NECC) National Energy Control Center يبدأ بتشغيل المحطات المائية (السد العالي) أولاً ، إن كان ذلك متاحاً طبقاً للترتيبات مع وزارة الري ، وإلا فسيلجأ للمحطات الغازية لسرعة ضبط التردد.

والعاملين السابقين أساسيين فى حساب ما يعرف بالـ Unit Commitment أى تحديد الوحدات المناسبة لحمل ما ، وهى عملية رياضية معقدة نسبياً لذا تحتاج إلى ما يعرف بالـ Optimization Techniques من أجل تنظيم جدول تحميل الوحدات المختلفة بالشبكة. ولتحديد الحمل الاقتصادى على المولد نلجأ إلى ما يعرف بحسابات الـ Economic Load Dispatch .

- 4- تقليل الفقد فى الشبكات ، فاختيار المحطات القريبة من الأحمال سيوفر فى كمية الـ Power Loss
- 5- نوعية الوقود ، أحيانا تكون مضطراً لتشغيل محطة ما لا تحقق كل المكاسب السابقة لأن البديل لها غير متوفر بسبب نقص الوقود المتاح مثلاً ، كأن تلجأ لتشغيل محطات بالمازوت بدلاً من الغاز لعدم توافر الغاز الطبيعى أو نقص إمداداته.

والشكل 10-1 والشكل 11-1 يمثلان نموذجين لنسبة مشاركة كل محطة كهربية فى القدرة الكهربائية الإجمالية (القدرة الفعالة وغير الفعالة) فى يوم (26 نوفمبر 2015) طبقاً لمركز التحكم القومى فى مصر لنقل الكهرباء .

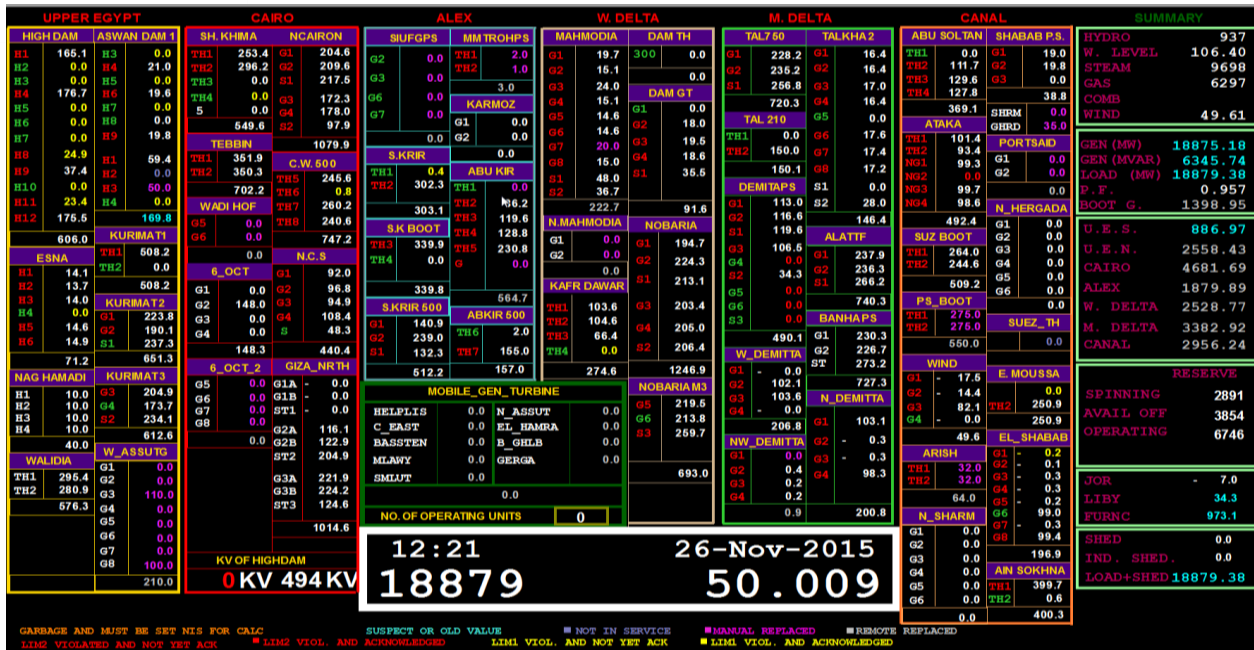
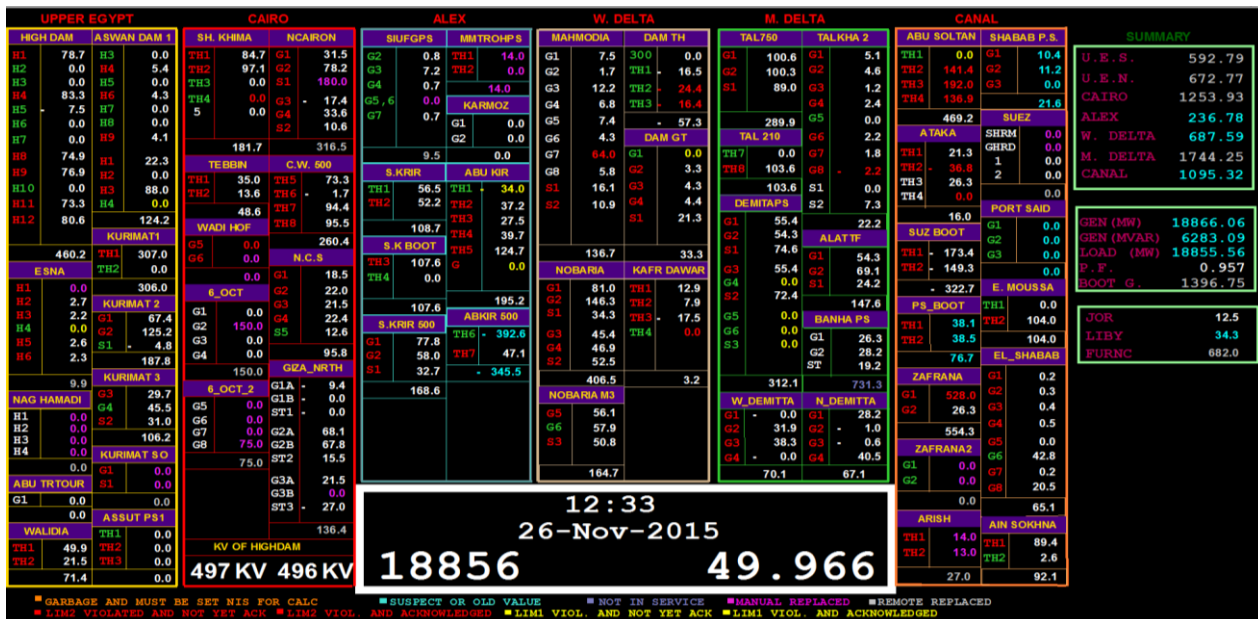


Figure I-10



قراءات كافة المحطات (وحدات التوليد بكل محطة) كما تظهر على شاشات المركز القومي للتحكم Figure I-11

والشكل 1-12 يعطى نموذجاً لما يعرف بالـ Daily Load Curve أى منحنى التحميل اليومي . والشكل خاص بمنحنى الحمل فى أمريكا ، وفيه يظهر ترتيب دخول نوعيات محطات التوليد فى الخدمة حسب تزايد الحمل فى يوم من أيام الصيف فى أمريكا. لاحظ أن المحطات التى تخدم الـ Peak load أهمها المائية ومحطات الطاقة المتجددة.

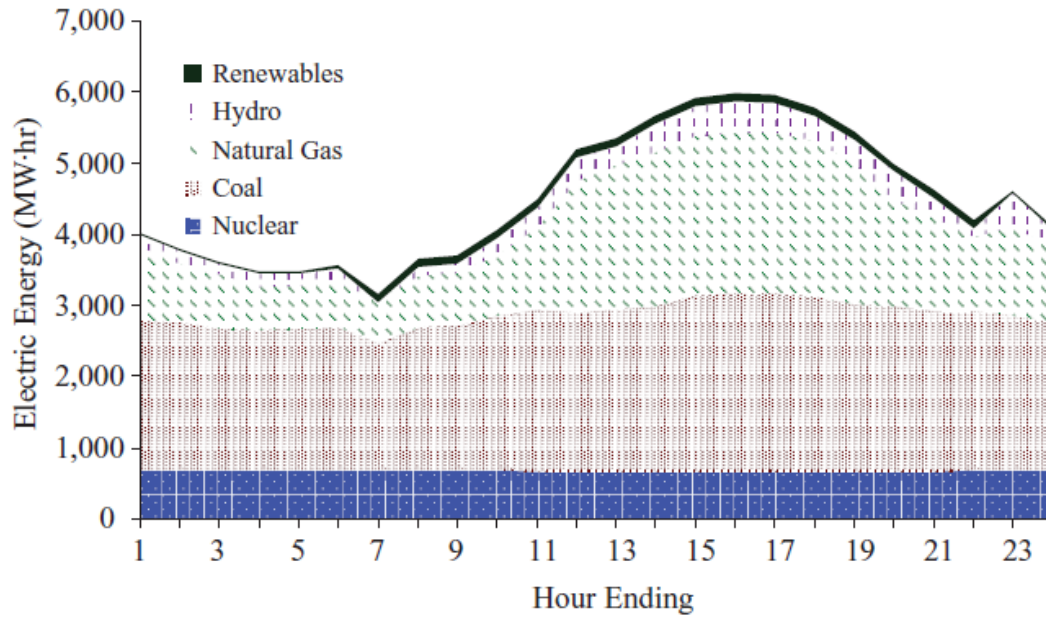


Figure 1-12 توزيع محطات التوليد المختلفة على منحنى الأحمال بأمريكا

لاحظ في الشكل السابق أيضا حجم التنوع في مصادر الطاقة هناك: نووى وغازى ومتجدد ومائى.

والشكل 1-13 يؤكد هذه الملحوظة .

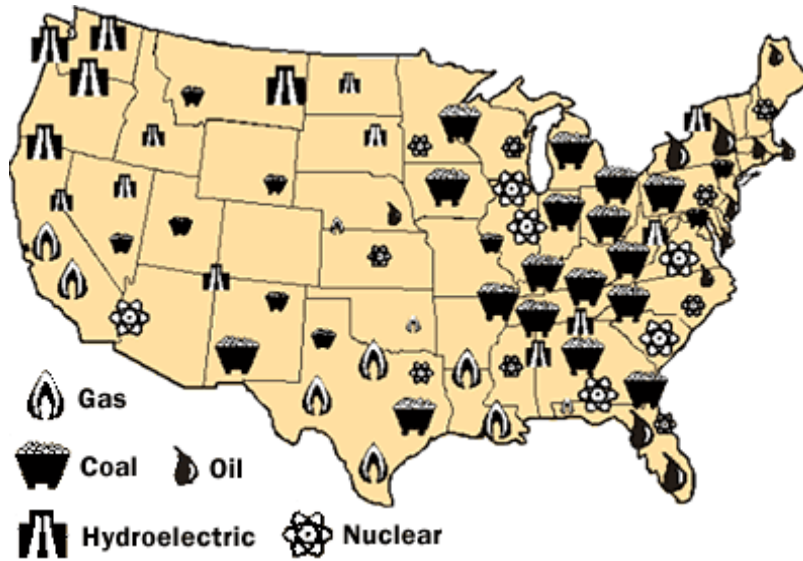


Photo courtesy [U.S. Department of Energy](https://www.energy.gov)

A breakdown of the major power plants in the United States , by type

Figure 1-13 تنوع مصادر الطاقة في محطات الكهرباء بأمريكا

وأهمية هذه الملحوظة تظهر من معرفة أن نقطة الضعف الأساسية في معظم الشبكات العربية ومنها مصر ، هو أنها تعتمد تقريبا على مصدر واحد للطاقة الكهربائية (المحطات الحرارية التي تعمل بالغاز أو المازوت) ، وبالتالي حين نفقد

هذا المصدر الوحيد لأي سبب تحدث أزمة كما حدثت في مصر صيف 2013 و 2014 . بينما احتمالية حدوث ذلك في شبكة مثل أمريكا مستبعد تماما كما هو واضح من المخطط السابق.

1.1.8 ما المقصود بالـ Spinning Reserve ؟

المقصود هو أنه لو كان لدينا مولد مثلاً بقدرة 100 ميغاوات مثلاً ويغذى فقط حمل قدره 40 ميغاوات ، و كان بالشبكة محطة توليد أخرى صغيرة بقدرة 30 ميغاوات وتعمل متزامنة مع المحطة الأولى وتعرضت لعطل فخرجت من الخدمة فإننا نقول أن المولد الأول لديه فائض قدرة Hot Spinning Reserve يقدر بـ 40-50 ميغاوات ومن ثم يستطيع أن يعوض بسرعة خروج هذه المحطة الصغيرة (لكن بالطبع سيتوقف ذلك على الـ Inertia الخاصة به كعنصر ثانى بالإضافة للقدرة المتوفرة).

لاحظ أنه يسمى Hot Spinning reserve لأنه يمثل قدرة توليدية in operation ، لكنها ليست in service ، أى ليست فى الخدمة. وبالطبع هذا يختلف عن Cold Spinning Reserve ، والذي يقصد به المحطات المفصولة لكن يمكن استدعائها للخدمة.

مزيد من التفصيل حول هذا الموضوع تجده بالباب السادس من هذا الكتاب.

بالطبع لو كان المولد محملاً بقدرة 90 ميغاوات مثلاً فلا نستطيع أن نقول أن لدينا أى فائض Reserve ، ونكون أمام مشكلة استقرار حقيقية قد يكون حلها هو الـ Load Shedding .

(راجع الشكل 10-1 و 11-1 لترى كيف تظهر قيمة الـ Spinning reserve على شاشات مركز التحكم)

1.2 كيف يتم التحكم فى العلاقة بين الأحمال والتوليد؟

من الشكلين السابقين 10-1 و 11-1 المأخوذ من المركز القومى للتحكم بمصر تبين أن كل محطة تشارك بنسبة معينة من الحمل الكلى على الشبكة ، وسنحاول هنا أن نجيب على سؤالين مهمين:

السؤال الأول : كيف يعرف المولد أن الحمل المتصل عليه قد زاد أو نقص؟
والسؤال الثانى : كيف يمكنه أن يغير ظروف تشغيله بعد أن عرف أن الحمل قد زاد أو نقص؟

نعلم أن العلاقة بين القدرة المولدة من هذا المولد والحمل Load المتصل به تحكمها العلاقة التالية:

$$P \text{ (mechanical)} = T \text{ (mechanical)} \times \omega = P \text{ (Electrical)}$$

ومن هذه المعادلة يمكن فهم ما يحدث عند تغير الأحمال (وسنأخذ المحطات البخارية كمثال هنا) .

ففى الوضع الطبيعى يكون العزم الكهربى والميكانيكى متساويين عند سرعة الدوران الثابتة ω ، ثم عند زيادة الحمل فإن Electric Torque يصبح أكبر من Mechanical Torque ، وينشأ عن ذلك انخفاض فى السرعة يتم اكتشافه بسرعة ويعالج بمرور كمية أكبر من البخار إلى التربينه ، ومن ثم يزداد Mechanical Torque حتى يتساوى مع Electric torque فى قيمته الجديدة ويعود المولد إلى الاتزان مرة أخرى.

ويجب أن تظل السرعة ثابتة لأنها مرتبطة بعلاقة وثيقة ب Frequency حسب المعادلة:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

حيث f هى التردد و p عدد الأقطاب و n هى السرعة

1.2.1 التردد وعلاقته بالتغير فى الأحمال

يعتبر التردد هو المؤشر الحقيقى على حالة التوازن بين الـ Load Demand و بين الـ Supplied Power.

نسب فصل الأحمال بمصر حسب التردد Table 1-2

التردد Hz	نسبة فصل الحمل
49.2	%2
49.1	%3
49	%4
48.9	%7
48.8	%15
48.7	%20
48.6	%22

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد يدل على وجود اتزان بينهما واستقرار فى الشبكة ، غير أن التغير البسيط فى التردد شئ طبيعى ومقبول إذا كان فى مدى صغير ، فإذا زاد عن ذلك المدى الصغير فيمكن التحكم فيه أوتوماتيكيا بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير أكثر من ذلك فربما نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد مدى التغير جدا فربما نصل فى النهاية إلى الفصل التام للمولدات نفسها وهو ما يؤدي إلى حدوث الإظلام التام .Blackout

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول نسب فصل الأحمال عند كل تغير فى التردد يختلف من بلد لآخر . والجدول 1-2 يمثل حدود ونسب الفصل فى مصر .

1.2.2 كيف يحدث الـ Blackout ؟

من الأخطار التي تهدد الشبكة الكهربائية حدوث ما يسمى بالإفلام التام أو الـ Blackout ، وتمثل حالة فشل الشبكة في الحفاظ على ثبات الجهد والتردد مما يؤدي إلى خروج كل وحدات التوليد من الخدمة ومن ثم انقطاع الكهرباء عن كل الأحمال.

والشبكة الكهربائية كما نعلم مكونة من محطات توليد متصلة ببعضها البعض لتغذي الأحمال الكهربائية ، لكن الشيء الغريب فيها أنه لا يوجد عنصر واحد من عناصر الشبكة الكهربائية يمكنه أن يخزن الطاقة ، وبالتالي ففترة تخزين الكهرباء هي صفر ، بمعنى أن الطاقة المولدة مستنفذة دائما لحظيا ، وسرعة مرور الكهرباء من المصدر للحمل هي سرعة الضوء ، أي أن كل شيء يتم لحظيا .

ولابد من استمرار التوازن بين الطلب والتوليد : فهناك طلب من ملايين المستهلكين الذين لديهم أحمال تحتاج إلى قدرة فعالة (MW) P ، وأحمال أخرى تحتاج إلى قدرة غير فعالة (MVAR) Q و في نفس اللحظة مطلوب من محطات التوليد توفير هذه الطلبات لحظيا . إذن فهو نظام شديد التعقيد ، وبمجرد أن يختل هذا التوازن تسقط المنظومة كلها ويحدث الإفلام التام.

ولنفترض على سبيل المثال أنه في وقت من أوقات الذروة ، حيث الشبكة تعمل على أقصى قدرة توليد ممكنة ، ثم لسبب ما حدث عطل في محطة من محطات التوليد فتوقفت وخرجت من الخدمة فجائيا. فعندما تخرج هذه المحطة يجب على المحطات الأخرى أن تعمل وبسرعة على توفير الطاقة اللازمة لتعويض النقص الناشئ عن خروج تلك المحطة ، ولكننا في وقت الذروة كما ذكرنا وكل الوحدات تعمل بأقصى قدرة ولا تستطيع أن تتحمل أي زيادة في الأحمال ، وعندما يبدأ حدوث زيادة في تحميل المولدات (over load) تضطر نظم حماية هذه الوحدات إلى إخراجها من الشبكة حتى لا يحترق المولد فيزداد الوضع تعقيدا ، وقد تتوالى عمليات الخروج حتى نصل إلى الـ Blackout ، وهذا أحد سيناريوهات حدوث الـ Blackout .

1.2.3 أشهر أسباب حدوث الـ Blackout

ومن أشهر أسباب حدوث الـ Blackout أن تخرج محطة من محطات الربط الرئيسية في الشبكة ، كأن تخرج محطة من محطات ربط شبكتي الـ 220/500 والتي تعمل على ربط الشبكتين الكبيرتين في مصر (كمحطة باسوس أو سمالوط مثلا في الشكل 1-7) ، وهذه المحطات تساعد في تبادل الطاقة بين الشبكتين الكبيرتين حسب الحاجة ، فخروج واحدة من هذه المحطات الرئيسية تعني حدوث نوع من الانفصال بين الشبكتين ، بل إن خروج محطة مثل سمالوط في شكل 1-7 يعني فصل الوجه البحري عن الوجه القبلي في مصر ، ومن ثم يمكن أن يتغير التردد في أحدهما أو كلاهما بالزيادة أو النقصان حسب نسبة الأحمال على كل شبكة ، فإذا وصلت قيمة التغير في التردد لقيمة خطيرة فسيتم فصل المولدات بهذه الشبكة (تفسير ذلك لاحقا في هذا الفصل) ، مما يعني إفلام جزئي قد يتحول إلى كلي.

وقد نصل لنفس النتيجة السابقة إذا كانت المشكلة فى خروج خط أو أكثر من خطوط الربط الرئيسية بين الشبكتين ، فعندها يمكن أن تحدث Power Swing عالية وتخرج خطوط أخرى بالوقاية المسافية أو تخرج مولدات بواسطة الـ Out of Step protection وتتعد المشكلة.

وأشهر حوادث الـ Blackout ترتبط دائما بفترات الصيانة أو عمل مناورات خاطئة ، ومفهوم المناورة أن يتم فصل خط معين وتوزيع أحماله على خطوط أخرى بناء على دراسة مسبقة تؤكد تحمل هذه الخطوط للحمل الزائد المتوقع عليها ، وتؤكد أيضا تحمل وحدات التوليد فى بعض المحطات للتوزيع الجديد للحمل ، ولكن أحيانا ونتيجة أخطاء قاتلة فى حساب الـ Load Flow يتم السماح بعمل المناورات ثم نتفاجئ بأن الخطوط أو وحدات التوليد لا تتحمل الحمل الجديد وتبدأ فى الخروج بصورة متتابعة .

1.2.4 خطوات إعادة تشغيل الشبكة Restoration

أهم ملحوظة هنا أن تعرف أنك لكى تولد كهرباء فإنك تحتاج لكهرباء ، بمعنى أنه بعد حدوث الـ Blackout فإنه ليس بالسهولة أن تبدأ مرة أخرى فى تشغيل محطات التوليد ، لأن أى محطة لكى تبدأ فى إنتاج الكهرباء فإنها تحتاج لقدرة كهربية قد تصل لعدة ميجاوات لمجرد بدء تشغيل مساعدات المحطة (الإثارة وأنظمة التبريد والمحركات ، Motors ، والمضخات Pumps ، والضواغط Compressor ، وأجهزة التحكم الخ). وحيث أننا فى حالة انقطاع تام للكهرباء فليس أمامك سوى طريقين لاستعادة الشبكة:

- أ- إما بتشغيل المحطات التى بها وحدات توليد ديزل خاصة بفترة الـ black start ، فهذه الوحدات تبدأ بالتوليد ذاتيا ، فتساعد فى بدء تشغيل المحطة ، ومن ثم يظهر إنتاج هذه المحطة على الشبكة ، فتستخدمة المحطات الأخرى فى تغذية أحمال المساعدات Auxiliaries بها.
- ب- أو يمكن فى هذه المرحلة الاستفادة من الربط الدولى لتمرير كمية من الطاقة إلى الشبكة من إحدى الدول المجاورة تكفى لبدء تشغيل مساعدات محطات التوليد لكى تستطيع المحطات أن تبدأ .

ويتم استعادة الشبكة بعد حدوث الإظلام التام باتباع الخطوات التالية :

- 1- التوسع فى إدخال وحدات التوليد الغازية حيث أن مساعداتها لا تحتاج لقدرة عالية لبدء التشغيل.
- 2- تشغيل المحطات البخارية الضخمة بواسطة القدرة المولدة من وحدات التشغيل الغازية فى الخطوة السابقة.
- 3- إطلاق الجهد على شبكة الـ 500 kV وشبكة الـ 220 kV دون توصيل أى أحمال in operation ، وهذا معناه تشغيل المولدات وتوصيل المحولات ولكن على وضع no load .
- 4- البدء فى توصيل الأحمال تدريجيا لضمان ثبات الجهد والتردد.

5- التوسع في إدخال محطات التوليد تدريجياً مع تقسيم الشبكة إلى جزر منفصلة ، بمعنى تقسيم الأحمال على المحطات الأقرب لها دون اتصال بين هذه الجزر ، ثم تجهيز الجزر المنفصلة للربط وإعادة تكوين الشبكة مع مراعاة شروط التوافق Synchronization كما سنرى لاحقاً حين الحديث عن ربط المولدات معا على التوازي. (قد تستغرق هذه العملية عدة ساعات وقد تصل إلى يوم كامل أو أكثر لأنه في بعض الأحيان يكون من الصعوبة بمكان تحقيق شروط التوافق Synchronization في هذه الظروف ، ويكون التأخر أحيانا مرجعه إلى وجود مشكلة أخرى في شركات الاتصالات التي تأثرت هي الأخرى بانقطاع الكهرباء) ومن ثم يصعب التواصل بين المحطات وبين مركز التحكم.

1.3 طرق التحكم في التردد :

1.3.1 استخدام المنظم Governor في التحكم في التردد

هو مكون من مكونات أى نظام كهربى متصل بالشبكة الموحدة ، ودوره أن يحافظ على تردد المولد متساوياً مع تردد الشبكة الموحدة . و الـ governor ليس له شكل ثابت ولكنه دائماً يظهر في المحطة مع الجزء المسئول عن إدارة التربينه ، ففي المحطة البخارية يكون الـ governor عبارة عن صمام Valve للتحكم في كمية البخار ، و في المحطة الغازية يكون الـ governor عبارة عن بوابات للتحكم في غرف الاحتراق ، أما في المحطات الهيدروليكية فيمثل الـ Governor ببوابات التحكم في المياه و لكن يتطلب من الـ Governor في هذه المحطات قوة كبيرة جداً للتحكم في هذه البوابات.

1.3.2 طريقة عمل الـ Governor في المحطات البخارية:

يقوم الـ governor بدور المتحكم في السرعة عن طريق المقارنة بين إشارتين : الإشارة الأولى تتناسب قوتها مع سرعة المولد ، و الإشارة الثانية تتناسب مع تردد الشبكة الموحدة ، فإذا كانت إشارة المولد متساوية تماماً مع إشارة الشبكة فإن الـ governor ليس له حاجة ، و لكن في حالة زيادة تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتضييق فتحة صمامات البخار Governor Valves لترجع السرعة للسرعة التزامنية و بالتالي يتساوى التردد مع تردد الشبكة.

وفي حالة نقصان تردد المولد عن تردد الشبكة فإن الـ governor يقوم بتوسيع فتحات صمامات البخار لترجع السرعة لطبيعتها و تتساوى مع تردد الشبكة. والصورة التالية في الشكل 1-14 تمثل شكل وحدات التحكم في الـ Governor بإحدى المحطات بمصر .

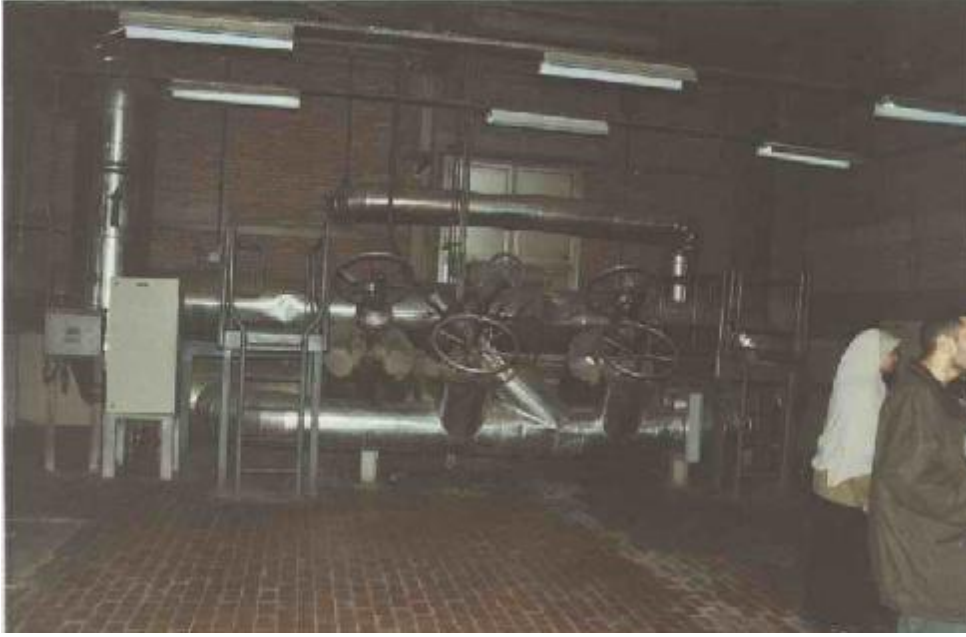


Figure 1-14 Governor

1.3.3 أنواع الـ Governor :

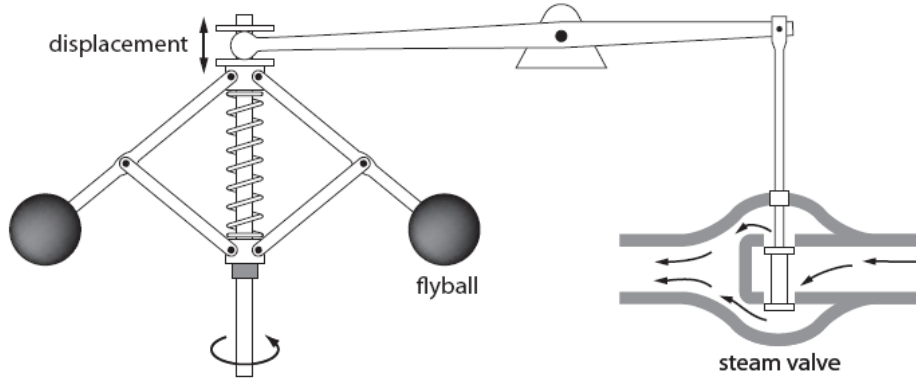
1. النوع الميكانيكى و هو أقدم الأنواع و لم يعد يستخدم بكثرة .

فعند حدوث over load تقل السرعة فتقل قوة الطرد المركزي بين الكرتين Fly ball ، وتقل المسافة بينهما مما يؤدي إلى زيادة فتحة الـ steam valve فتزداد كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.

وعندما يقل الحمل تزداد السرعة وتزداد قوة الطرد المركزية بين الكرتين Fly ball فتزيد المسافة بينهما مما يؤدي إلى ضيق فتحة الصمام البخارى فتقل كمية البخار وتعود السرعة والتردد إلى القيم الأصلية.

2. النوع الكهربى : ويكون التحكم هنا عن طريق استخدام سرفوموتور و ذلك لاستجابته العالية و هو المستخدم بكثرة الآن .

3. النوع الإلكتروني و يتميز بالدقة العالية و لكنه غير عملى نظرا لأنه يوجد صعود و هبوط للحمل بصورة مستمرة و قد يسبب تلف للأجزاء الميكانيكية نظرا لعدم التكيف مع سرعة الأجزاء الإلكترونية.



فكرة عمل المنظم الميكانيكي Figure 1-15

1.3.4 لماذا الخوف من تغير التردد؟

ارتفاع قيمة التردد تعنى زيادة سرعة دوران المولد ، مما قد يؤدي إلى تحطم المولد. أما انخفاض التردد فيعنى انخفاض الجهد (تذكر أن $E = k f \phi$) ، وانخفاض الجهد يؤثر بشدة على مساعدات المحطة Auxiliaries (مثل المحركات وخلافه) والتي يمكن أن تحترق (لأنها تعتبر أجهزة ثابتة القدرة Constant Power Devices وهذا يعنى أن انخفاض الجهد عليها يؤدي حتما لارتفاع التيار بها) ، علما بأن انخفاض الجهد قد يتسبب أيضا في احتراق الـ Rotor ، لأنه عند انخفاض الجهد سيتدخل الـ AVR ، Automatic Voltage Regulator ليرفع قيمة الجهد من خلال زيادة قيمة تيار الـ Rotor لينتج فيضا بكمية أكبر ، وهذا يمكن أن يتسبب في احتراق ملفات الـ Rotor . ولاحقا سيتم شرح تفصيل هذه النقطة.

1.3.5 لماذا نستخدم نظام الـ 50 أو 60 هيرتز؟

هناك بعض الأسباب التي أدت إلى استخدام هذه القيم تحديدا ، وعدم استخدام ترددات أعلى في أنظمة القوى الكهربائية. ويمكن فهم ذلك بالنظر للمعادلة $F = \frac{n_s \cdot p}{120}$ ، فإذا أردنا رفع التردد إلى 200 هيرتز مثلا فلدينا طريقتان لتحقيق ذلك:

- الطريق الأول هو زيادة السرعة n_s التي يدور بها الـ shaft ، وهذا يعنى أننا سنحتاج لكمية طاقة أكبر لزيادة السرعة لنفس كمية الكهرباء المتولدة ، كذلك سنحتاج لتصميم أقوى للـ shaft لتحمل القوة الناتجة من السرعة العالية.

- الطريق الثاني هو زيادة عدد الأقطاب p في المولد ، وبزيادته يزيد حجم المولد بشكل كبير.

ومن ثم فالطريقتان مسدودان.

ناهيك عن تأثير كفاءة النقل باستخدام ترددات عالية حيث سيؤدي ذلك إلى ازدياد الفقد وانخفاض الكفاءة وانخفاض الجهد وذلك لأن قيم المعاوقات في خطوط النقل ستزيد (تذكر أنها تتناسب طردياً مع التردد) وبالتالي سيزيد الهبوط في الجهد

$$\text{voltage drop} = I * Z, X \propto F$$

كذلك سيؤثر على ازدياد تأثير ظاهرتي corona , skin effect وهما مشروحتان تفصيلاً لاحقاً في الفصل التاسع.

لذلك استقرت معظم الدول على استخدام 50 أو 60 هرتز . فهناك دول كالولايات المتحدة تعمل على 60 هرتز، أما أوروبا و دول أفريقيا ، ومنها مصر فتستخدم 50 هرتز، و يوجد بعض الدول كاليابان والسعودية بها النظامان.

1.4 ربط المولدات على التوازي بالشبكة

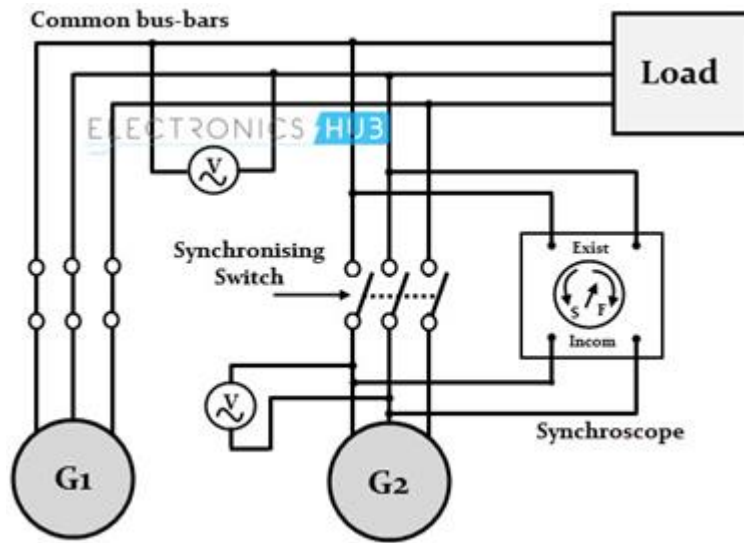
قبل بناء الشبكة الموحدة كانت دائماً فكرة توصيل المولدات على التوازي تجذب الاهتمام ، فنحن نحتاج في كثير من الأحيان إلى تشغيل مولدين أو أكثر على التوازي للحصول على عدة ميزات منها:

- 1- أن وجود العديد من المولدات يقلل كثيراً من احتمالية حدوث انقطاع للتيار الكهربى عن الأحمال ، بمعنى تحسين الاعتمادية Reliability لمنظومة الكهرباء ، فعند تعطل أو حدوث خروج فجائى لأي مولد لا يتسبب في فقدان التغذية الكهربائية للأحمال.
- 2- أن تشغيل عدة وحدات على التوازي يسمح بإجراء الصيانة الدورية دون حدوث ارتباك في تغذية الأحمال المطلوبة ، كما يساهم في التقليل من تكاليف الصيانة وقطع الغيار .
- 3- سهولة تعديل القدرة المولدة تبعاً لزيادة الأحمال وحتى الوصول إلى الحمل الأقصى ، بمعنى أنه في بعض الأوقات تكون الأحمال ليست بحاجة إلى القدرة المركبة للتوليد بالكامل وعليه يمكن فصل بعض المولدات طالما أن بقية المولدات تلبى الحمل في هذه اللحظة وهذا الأسلوب يهدف لرفع الكفاءة.
- 4- التقليل من استهلاك الوقود (يلاحظ أن كمية الوقود المستهلك لوحدة توليد قدرة 400 كيلو وات مثلاً تعمل عند 80% من السعة الكاملة (أي تغذي حمل قدرة 320 كيلو وات) ، هذه الكمية أقل من استهلاك الوقود في وحدة توليد قدرتها 800 كيلو وات وتغذي نفس الحمل (320 كيلو وات) والذي يمثل في هذه الحالة 40% فقط من سعتها الكاملة.
- 5- لا يشترط أن تكون وحدات التوليد المتصلة على التوازي لها نفس السعة ، مما يحقق استخدام الماكينات بأقصى كفاءة لها مع تغير الأحمال على مدار الوقت .

وهو نفس المنطق ونفس الميزات حين الحديث عن ربط محطة توليد بشبكة الكهرباء موحدة.

1.4.1 ما المقصود بعملية التزامن للمولدات ؟

وفي كلتا الحالتين سواء عند ربط مولدات معا على التوازي فى منطقة معزولة عن الشبكة أو ربط المولدات معا داخل الشبكة الموحدة فلا بد من تحقق شروط معينة لتنفيذ عملية الربط على التوازي ، وذلك من أجل ضمان أن يساهم المولد المضاف بجزء من القدرة الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال ، وتسمى عملية الربط هنا بعملية التزامن ويطلق عليها فى مصر عملية "التسنيك" وهو اشتقاق مصرى من كلمة Synchronization ، وتعرف علميا بأنها عملية ربط كهربية بين المولدات و جعلها متطابقة فى الجهد و التردد و زاوية الطور Phase Angle و ترتيب الأوجه Phase Sequence . والجهاز المستخدم لإتمام هذه العملية يسمى Synchroscope ، فعلى سبيل المثال عند ربط المولد G2 فى الشكل التالى على التوازي مع المولد G1 ، فإن هذا الجهاز يقوم بالتأكد من تحقق شروط التزامن التى سنتحدث عنها فى الجزء التالى قبل أن يغلق مفتاح ربط .



1.4.2 شروط تحقق تزامن المولدات:

الشروط التالية ضرورية ولازمة لتحقيق التزامن بين المولدات المتصلة معا على التوازي:

1- تساوى فرق الجهد الخارج من المولدات

من المعروف أن الجهد الخارج من المولد يساوى:

$$E_o = \frac{N_{sta} \Phi_{rot} \omega}{\sqrt{2}}$$

وهذا يعنى أن العوامل التى تؤثر فى قيمة جهد المولد هى:

1. سرعة دوران العضو الدوار بالمولد (ω)
2. عدد لفات العضو الثابت Stator ، N_{sta}

3. شدة المجال المغناطيسى الناتج من الـ Rotor ، ϕ_{rot}

و بما أن سرعة العضو الدوار rotor يجب أن تكون ثابتة للحفاظ على ثبات التردد ، و بما أن عدد اللفات ثابتة حسب التصميم الأساسى ، ومن ثم لم يتبق لضبط قيمة الجهد الخارج من المولد عند ظروف التحميل المختلفة سوى التحكم فى تيار المجال المغناطيسى المار بالـ Exciter المركب على الـ Rotor ، ومن ثم التحكم فى شدة المجال و يتم ذلك بواسطة جهاز AVR (Automatic Voltage Regulator) و الذى يزيد من تيار Exciter عند نقصان جهد المولد والعكس بالعكس ، و ذلك للحفاظ على الجهد الخارج ثابت (مثلا 20 kV). راجع تفصيل ذلك فى الشكل 7-3 بالفصل الثالث.

2- تساوى تردد الجهد من جميع المولدات

و من المعروف أن التردد Frequency الخاص بالجهد الناتج من المولد تتحدد قيمته حسب المعادلة التالية :

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

حيث f هى التردد و p عدد الأقطاب و n هى السرعة

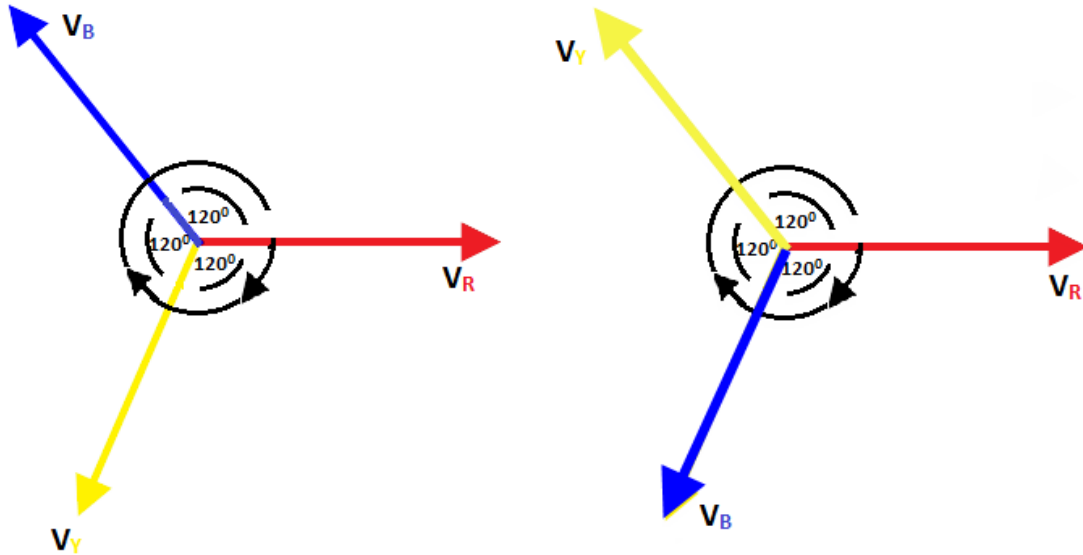
وهذا يعنى أنه يعتمد على عاملين أساسيين هما:

- عدد الأقطاب p
- سرعة دوران الـ rotor ، n

وبما أن عدد الأقطاب ثابت ، فبالتالى لا يمكن التحكم فى التردد إلا عن طريق التحكم فى سرعة عمود دوران المولد ، وهذا يتم من خلال الـ Governor المسئول عن التحكم فى كمية الوقود المحترق للوصول للتردد المطلوب ، وقد سبق شرح طريقة عمله.

3- تطابق الـ phase sequence فى جميع المولدات

ويسمى تعاقب الطور ، أى يجب توصيل الـ Phases بالترتيب بحيث لو تخيلت أن أحد المولدين كان ترتيب الـ Phases هو R-Y-B بينما الترتيب فى المولد الثانى كان R-B-Y فهذا يعنى أن المولدين لا يمكن أن يصلا لحالة التزامن بسبب اختلاف قيمة الجهد as magnitude and angle بين وجهين two phases من الثلاثة. تذكر أن 100 فولت بزاوية 120 درجة مثلا لا يساوى 100 فولت بزاوية 240 مثلا.



4- تطابق الـ phase shift بين جميع المولدات

الشرط الرابع من شروط التزامن وهو تساوى زاوية الترحيل بين الأطوار (الـ Phase angle الموجودة بين الـ Phases) لجميع المولدات الموصلة على التوازي ، ويقصد بها الزاوية بين Phase-A مثلا في مولد و Phase-A في المولد الآخر المتصل به على نفس الـ Bus bar .

و يتم التأكد من جميع الشروط السابقة إما يدويا بنظام اللمبات ، أو عن طريق جهاز يسمى الـ Generator Synchroscope (شكل 1-16) ، و هو جهاز يقوم بإغلاق القاطع CB أوتوماتيكيا (وبالتالي ربط المولدات معا على التوازي) فقط عند تحقق جميع الشروط السابق ذكرها .



Figure 1-16 Automatic Synchronizer

1.5 خطوات توصيل مولد بالشبكة الموحدة يدويا

الجزء التالي يشرح كيفية تحقيق الشروط الأربعة السابقة عمليا:

1.5.1 الخطوة الأولى: ضبط السرعة

نقوم بتدوير التربيننة والتحكم فى كمية البخار حتي تصل سرعتها إلى قيمة أعلى قليلا من الـ synchronous speed (N_s) التي تحقق تردد الشبكة والذي يتم حسابه من المعادلة

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

حيث P هو عدد الأقطاب. والهدف من ذلك التأكد من أن سرعة المولد الداخل على الشبكة لن تكون بأى حال أقل من سرعة المولد التزامنية ، وإلا فالشبكة القوية ستعتبره كأنه موتور .

وبضبط السرعة وتساوى التردد يتم تحقيق الشرط الأول. ويمكن ملاحظة ضبط السرعة من خلال الـ Synchro scope .

1.5.2 الخطوة الثانية: ضبط الجهد

بزيادة تيار الـ DC في الـ exciter (وهو تيار المجال I_f) وبالتالي يتولد الـ Φ_{rot} ، flux ، اللازم للوصول بقيمة جهد المولد للجهد المساوى للمولد الآخر إذا كان الأمر يتعلق بربط مولدين معا ، أو مساويا لجهد الشبكة إذا كان الأمر يتعلق بربط مولد بالشبكة العامة. (تذكر أن الجهد على أطراف المولد يحسب طبقا للمعادلة):

$$E_o = \frac{N_{sta} \Phi_{rot} \omega}{\sqrt{2}}$$

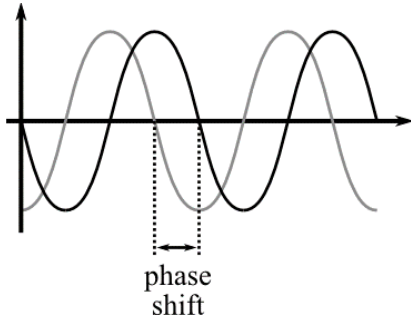
ومن ثم فمع تزايد I_f يصل الجهد على أطراف المولد إلى جهد يساوي جهد الشبكة . وبذلك يتم تحقيق الشرط الثاني.

1.5.3 الخطوة الثالثة : ضبط الـ phase sequence

وهي تطابق الـ Phases للمولد بالضبط مع الشبكة (same phase sequence) وهذا الشرط يمكن التأكد من تحققه عن طريق ملاحظة اللمبات فلو كانت الـ Phases في الناحيتين غير متطابقة (كأن يتم مثلا توصيل phase a من المولد مع phase b للشبكة) فإن اللمبات لا تضىء وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت ولكن تضىء واحدة بعد الأخرى . لكن إذا تطابقت ترتيب الـ Phases فستجد اللمبات تضىء وتطفئ مع بعضها في نفس الوقت (بالطبع ستكون شدة الإضاءة ضعيفة بسبب تقارب إن لم يكن تساوى جهدي المولد الأول الموجود أصلا بالخدمة والمولد الثاني المراد إدخاله للخدمة) وبذلك نكون حققنا الشرط الثالث.

1.5.4 الخطوة الرابعة : ضبط الـ phase shift

وهي أن نجعل الـ $\text{phase shift} = 0$ ، وليس كما في الصورة المجاورة التي بها phase shift بين المولدين .



وحتى نحقق ذلك لابد من جعل سرعة التربينه تساوي N_s بالضبط .
وللتوضيح فإن ما يحدد هذه الزاوية هو موضع الأقطاب الـ Field Poles الخاصة بالمولد في الفراغ بالنسبة للـ Stator Phases .
وعند اختلاف موضع الأقطاب في المولدين تنشأ هذه الزاوية ،
وللتغلب على هذه الزاوية فإننا نزيد أو نقص سرعة المولد لحظياً ثم
نعود إلى نفس السرعة .

لاحظ أنه عند زيادة السرعة لحظياً لضبط الـ phase shift نجد أن إضاءة اللمبات تزداد وتتناقص بشكل متتابع بحيث يبدو الضوء كما لو أنه يدور في اتجاه عقارب الساعة. وعندها سنجد أن اللمبات تومض مع بعضها بشكل بطيء (تتوقف سرعة الإضاءة على فرق السرعة بين المولد الأول والثاني) .

وهنا نستطيع أن نقول أن الشرط الرابع تحقق وبالتالي يمكن أن نغلق المفتاح لتوصيل المولد بالشبكة ، وبالطبع يغلق المفتاح في لحظة انطفاء اللمبات.

1.5.5 الطريقة الآلية: (Automatic method)

يُفضل دائماً العمل بالنظام الآلي إذا لم يتوافر عمالة مدربة ، وذلك باستخدام الـ (synchronizer) وهو مسئول عن أداء جميع وظائف الرصد والمراقبة اللازمة لعملية التزامن في المولدات الكهربائية وإغلاق الـ breaker دون تدخل مهندس التشغيل ، حيث يحدد المهندس فقط القيم الأولية اللازمة لبدء عمل المولد بينما يقوم الـ (synchronizer) بقياس تردد المولد كما يقوم بالتحكم في الـ (governor) وكذلك التحكم في الـ (AVR) من أجل أن يضبط قيم الجهد magnitude وقيمة زاوية الطور (phase angle) ، وعندما تكون شروط التزامن متحققة يقوم الـ (synchronizer) بغلق الـ Synchronizer switch وإتمام عملية التزامن.

ويوجد أيضاً جهاز يسمى (synchro-check relay) للتأكد من استيفاء شروط التزامن جميعها وهذا زيادة في الأمان ، ويستخدم هذا الجهاز أيضاً في الطريقة اليدوية للأمان.

1.5.6 ماذا يحدث لو تمت عملية الربط بدون هذه الشروط؟

بداية تذكر أن تردد الـ induced Emf المتولدة على الـ stator winding تتناسب مع سرعة دوران الـ Rotor ، فإذا ربطنا المولد مع الشبكة بتردد مختلف عنها مثلاً فإن الشبكة ستجبر المولد على ترددها ، بمعنى أنه لو كانت سرعة تربينة المولد 2400 RPM أى ما يعادل تردد يساوى 40 Hz فإنه بمجرد الربط مع الشبكة سيرتفع تردده إلى 50 Hz وهذا يعنى أن الشبكة ستجذب المولد لتردها فيحدث تسارع مفاجئ للـ turbine shaft مما قد يؤدي إلى

تدمير الـ shaft ، بالإضافة إلى أن القوة التي ستتولد على الـ shaft تعني زيادة العزم مما يعني ارتفاع مفاجئ في التيار المار في ملفات الـ stator.

أما في حالة الربط على جهد مختلف فإن المولد - والذي يعتبر مصدرا للقدرة غير الفعالة (Reactive power) - إذا كان جهده أقل من جهد الشبكة ، فلن يستطيع إنتاج القدرة غير الفعالة اللازمة لرفع الجهد ، وبالتالي ينخفض الجهد بشكل كبير ، ويدور المولد وكأنه موتور وليس مولد. كما سيمر تيار Circulating current بين المولدات مما يؤدي إلى احتمالية احتراق أحد المولدات أو جميعها.

وهذا كله يمثل خطرا أكيدا على المولد ، ومن هنا جاءت أهمية عملية التزامن.

1.6 توزيع القدرة بين المولدات في الشبكة Load Sharing

ونقصد به التقسيم النسبي للـ kW و kVAR الكلية المطلوبة لتغذية الأحمال بين العديد من المولدات المتصلة على التوازي ، وهذا التقسيم ضروري لتجنب مشاكل over loading و مشاكل الـ stability في منظومة التوليد. بداية ، فإن الشبكة الكهربائية Grid يمكن أن تعرف بأنها — infinite Bus Bar, BB وهذا يعني أنها تشبه محطة كبيرة جدا ولن يؤثر دخول أو خروج حمل ما (سواء كان هذا الحمل P or Q) على قيمة الجهد أو التردد الخاص بها كما في 1-18. والخط الأحمر في الشكل يمثل العلاقة بين الجهد والـ Q أو العلاقة بين التردد والـ P في هذه الشبكة العامة.

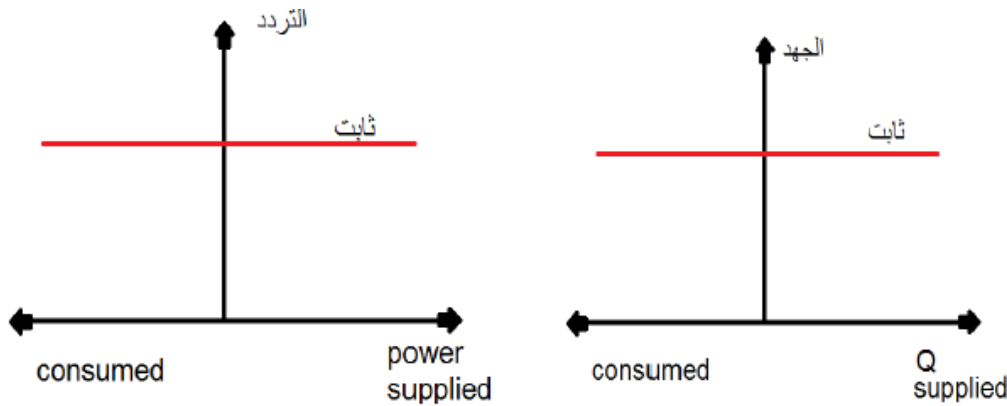


Figure 1-18 الجهد والتردد في الشبكة العامة

1.6.1 توصيل المولد منفردا على حمل معين

العلاقة بين الجهد والـ Q ، أو العلاقة بين التردد والـ P في المولدات المنفردة لا يمكن تمثيلها بخط مستقيم أفقي كما في الشكل السابق بل تمثل بعلاقة عكسية لها ميل يسمى الـ Droop ، وهذا يعني انخفاض التردد مع زيادة التحميل وانخفاض الجهد مع زيادة سحب الـ Q في المولدات المنفردة والتي سنحاول توصيلها على الشبكة العامة لتشارك في تغذية الأحمال كما سنرى.

وعمليا يطلق على النظام الذي لا تتغير فيه قيم الجهد أو التردد مع زيادة التحميل اسم Isochronous ، بينما يطلق على خاصية الانخفاض في الجهد والتردد مع التحميل بخاصية الـ Droops . والشكل 1-19 يظهر الخاصيتين معا.

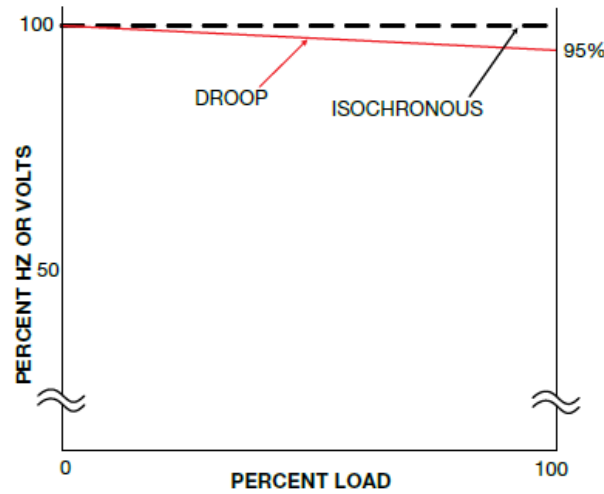


Figure 1-19

وليس بالضرورة أن يكون Voltage Droop وكذلك الـ Frequency Droop متساويين في الميل بل يمكن أن يكون لكل واحد منهما معادلته الخاصة به ، وهذه المعادلات تكون على الصورة التالية:

$$\text{Frequency (Hz) droop: } (100)[(Hz_{NL} - Hz_{FL}) / Hz_{FL}]$$

$$\text{Voltage (V) droop: } (100)[(V_{NL} - V_{FL}) / V_{FL}]$$

NL = no load

FL = full load

وتستخدم قيمة الميل هذه بعد ذلك ضمن معادلة معروفة لتحديد قيمة الـ P Active Power, المسحوبة من المولد عند توصيله على حمل معين كما في المعادلة التالية (توجد معادلة شبيهة للقدرة غير الفعالة لكن يستخدم فيها قيم الجهد بدلا من التردد ، ويستخدم فيها Voltage droop بدلا من الـ Frequency Droop)

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

Slope of curve, W/Hz
Operating frequency of the system

والمثال التالي يوضح كيفية تأثر قيمة التردد النهائي بعد توصيل المولد منفردا على حمل ما بقيمة الـ Droop وتأثره أيضا بقيمة تردد البدء . No load Frequency

Example-1

A generator with no-load frequency of 61.0 Hz and a slope s_p of 1 MW/Hz is connected to Load 1 consuming 1 MW of real power at 0.8 PF lagging. Load 2 (that to be connected to the generator) consumes a real power of 0.8 MW at 0.707 PF lagging.

- Find the operating frequency of the system before the switch is closed.
- Find the operating frequency of the system after the switch is closed.
- What action could an operator take to restore the system frequency to 60 Hz after both loads are connected to the generator?

The power produced by the generator is

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p}$$

- The frequency of the system with one load is

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p} = 61 - \frac{1}{1} = 60 \text{ Hz}$$

- The frequency of the system with two loads is

$$f_{sys} = f_{nl} - \frac{P}{s_p} = 61 - \frac{1.8}{1} = 59.2 \text{ Hz}$$

- To restore the system to the proper operating frequency, the operator should increase the governor no-load set point by 0.8 Hz, to 61.8 Hz. This will restore the system frequency of 60 Hz.

1.6.2 توزيع الأحمال بين المولدات المتصلة على التوازي

إذا كان لدينا مولدين متصلين معا على التوازي فيجب أن يتحقق شرطان حتى يتساوى توزيع الحمل بينهما:

- أن يكون لهما نفس الـ Voltage Droop ، و نفس الـ Frequency Droop حتى لو اختلف ميل النوعين كما ذكرنا في المقطع السابق .

- وأن تكون نقطة البدء لهما واحدة حتى يمكن تقسيم الحمل بينهما بالتساوي.

فإذا اختلف الميل أو نقطة البدء فسيكون أحدهما دائما أكبر من الآخر كما في الشكل 1-20.

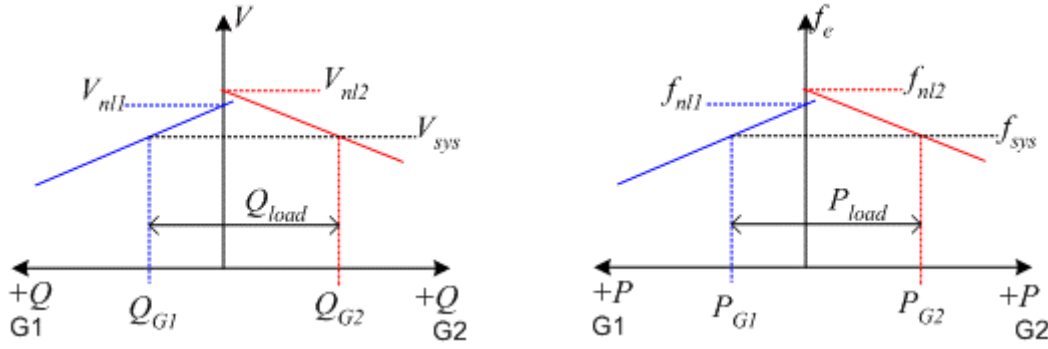
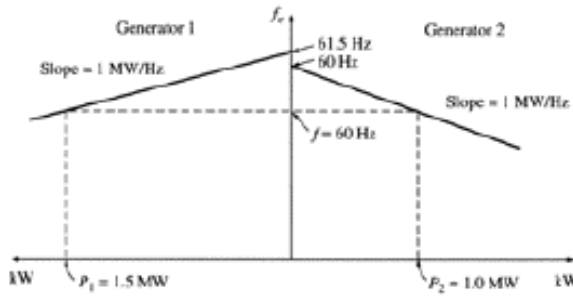


Figure 1-20

والمثال التالي يوضح كيفية توزيع حمل معين بين مولدين على التوازي .

Example-2

Two generators are set to supply the same load. Generator 1 has a no-load frequency of 61.5 Hz and a slope sp_1 of 1 MW/Hz. Generator 2 has a no-load frequency of 61.0 Hz and a slope sp_2 of 1 MW/Hz. The two generators are supplying a real load of 2.5 MW at 0.8 PF lagging.



- Find the system frequency and power supplied by each generator.
- Assuming that an additional 1 MW load is attached to the power system, find the new system frequency and powers supplied by each generator.
- With the additional load attached (total load of 3.5 MW), find the system frequency and the generator powers, if the no-load frequency of G2 is increased by 0.5 Hz.

The power produced by a synchronous generator with a given slope and a no-load frequency is

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

The total power supplied by the generators equals to the power consumed by the load:

$$P_{load} = P_1 + P_2$$

- The system frequency can be found from:

$$P_{load} = P_1 + P_2 = s_{p1} (f_{nl,1} - f_{sys}) + s_{p2} (f_{nl,2} - f_{sys})$$

as $f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.0 - 2.5}{1 + 1} = 60.0 \text{ Hz}$

The powers supplied by each generator are:

$$P_1 = s_{p1} (f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 60) = 1.5 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{p2} (f_{nl,2} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.0 - 60) = 1 \text{ MW}$$

b. For the new load of 3.5 MW, the system frequency is

$$f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.0 - 3.5}{1 + 1} = 59.5 \text{ Hz}$$

The powers are:

$$P_1 = s_{p1} (f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 59.5) = 2.0 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{p2} (f_{nl,2} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.0 - 59.5) = 1.5 \text{ MW}$$

c. If the no-load frequency of G2 increases, the system frequency is

$$f_{sys} = \frac{s_{p1}f_{nl,1} + s_{p2}f_{nl,2} - P_{load}}{s_{p1} + s_{p2}} = \frac{1 \cdot 61.5 + 1 \cdot 61.5 - 3.5}{1 + 1} = 59.75 \text{ Hz}$$

The powers are:

$$P_1 = P_2 = s_{p1} (f_{nl,1} - f_{sys}) = 1 \cdot (61.5 - 59.75) = 1.75 \text{ MW}$$

1.6.3 توزيع القدرة الفعالة بين المولد والشبكة العامة

وينقسم توزيع الأحمال أو الـ load sharing إلى نوعين :-

Active power (KW) load sharing -1

Reactive power (KVAR) load sharing -2

يتم ذلك بضبط Governor الخاص بوحدة التوليد المتصلة بالشبكة العامة لتغيير الـ no-load Frequency ،
 fn. وذلك للتحكم في كمية Power ، P-G التي يشارك بها مولد معين متصل على الشبكة العامة في تغذية الحمل
 الإجمالي Pload (اللون البنّي في شكل 1-21) علماً بأن علاقة القدرة والتردد للشبكة العامة تمثل بالخط الأحمر كما
 ذكرنا سابقاً بينما علاقة القدرة والتردد في المولد تمثل بالخط الأخضر .

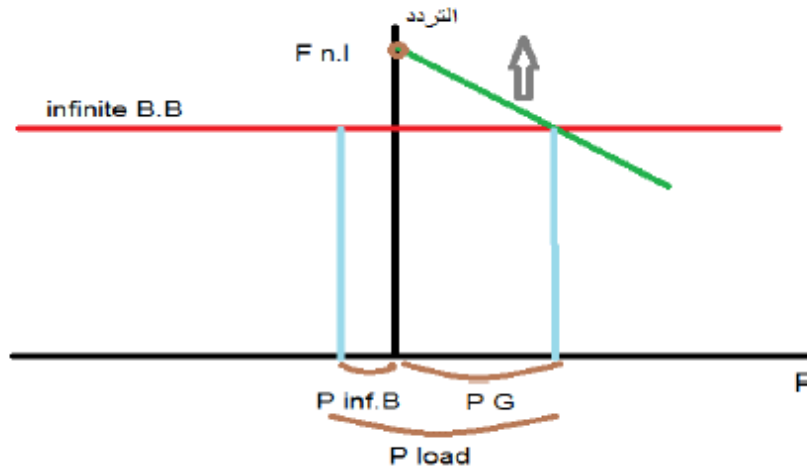


Figure 1-21 ربط مولد منفرد مع شبكة

ف عند رفع قيمة Governor set point for $F_{n.l}$ تزداد قيمة الـ Power المسحوبة من ذلك المولد وتقل قيمة الـ Power المسحوبة من الشبكة العامة (تعرف الشبكة العامة بأنها الشبكة متناهية القدرة ثابتة الجهد ، فمهما أخذت منها لا يتغير ترددها ولذا تسمى Infinite Bus Bar لأن ترددها دائما ثابت).

أما عند إنزال قيمة Governor set point for $F_{n.l}$ فسنتقل قيمة الـ Power المسحوبة (شكل 1-22) من ذلك المولد وستزيد قيمة الـ Power من الشبكة لأن الحمل ثابت.

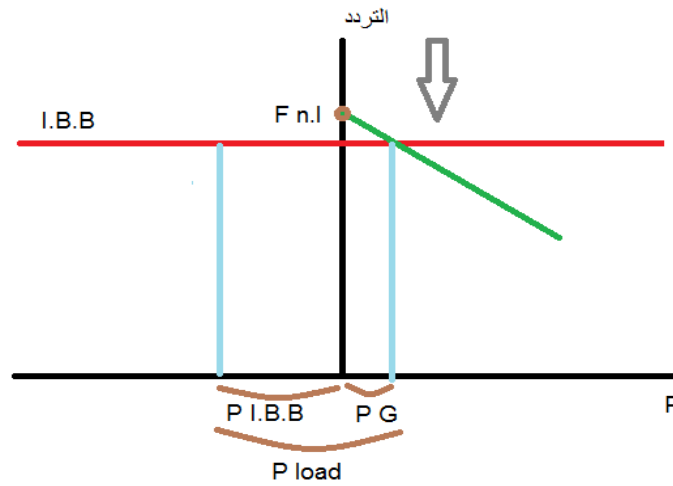


Figure 1-22 تحميل خفيف على المولد المنفرد

أما عند رفع Governor set point for $F_{n.l}$ بصورة كبيرة (شكل 1-23) فيمكن حينئذ تغذية الحمل بالكامل من المولد فقط بل ربما تزيد القدرة المسحوبة من المولد عن حاجة الحمل فيصبح المولد وكأنه يشارك أيضا في التغذية العمومية للشبكة ولكن عمليا يتم فصل المولد عن الشبكة في هذه الحالة.

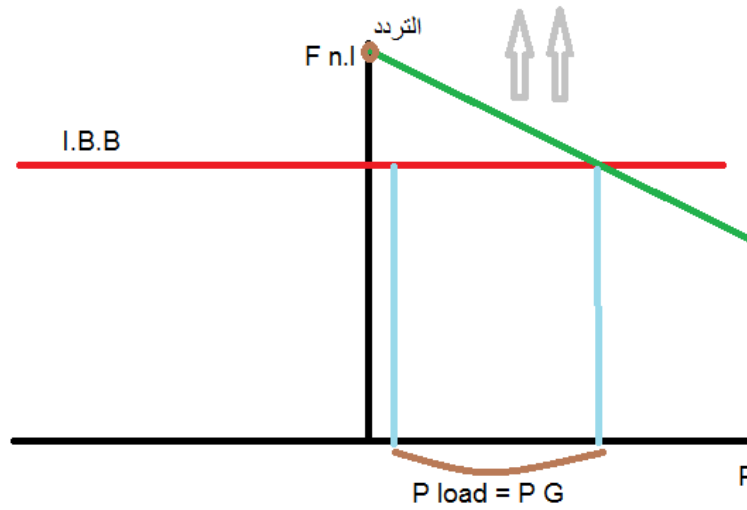


Figure 1-23 تحميل زائد على المولد المنفرد

Governor

أيضاً عند إنزال

set point for $F_n.l$ بصورة كبيرة (شكل 1-24) فإن القدرة التي يشارك بها المولد P_G ستكون أقل من الصفر في تلك الحالة وسيسحب power من الشبكة وسيعمل كموتور ولكن في هذه الحالة سيفصل reverse power relay المولد.

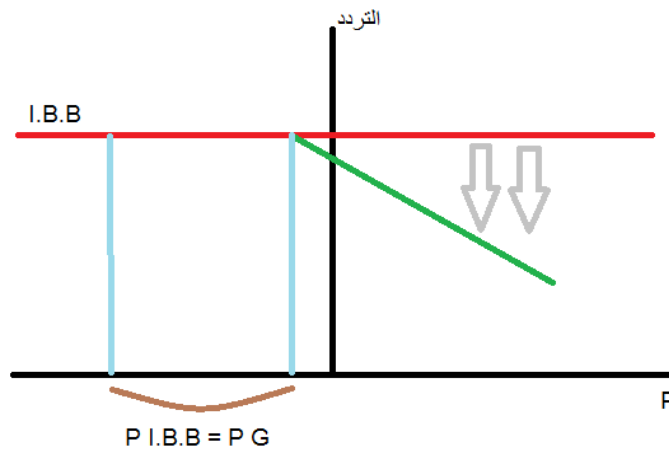


Figure 1-24 المولد يعمل كموتور

1.6.4 توزيع القدرة غير الفعالة بين المولدات

عندما يتصل أكثر من مولد معاً على التوازي ، فإننا يمكننا التحكم في مقدار Reactive Power KVAR الخارجة من كل مولد عن طريق Field Excitation System .

فعند زيادة field excitation المتولدة فإن ذلك يؤدي إلى زيادة (KVAR) المتولدة من هذا المولد (Over Excitation) ولكن سوف يؤدي إلى تقليل power factors لأن الـ Active power ستخضع طبقاً للـ D-curve الذي يمثل العلاقة بين الـ P and Q في المولدات المتزامنة ويظهر في الشكل 1-25.

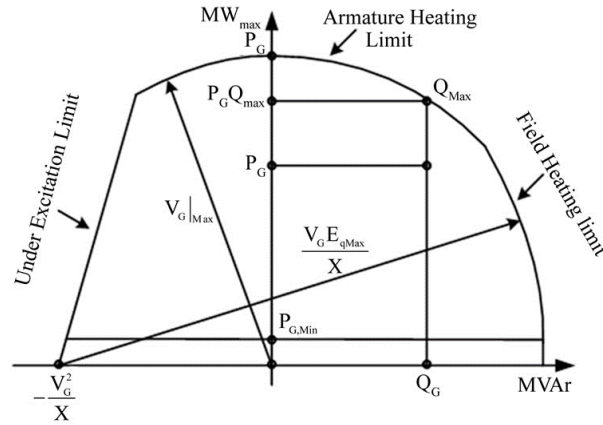


Figure 1-25 P-Q relation in D Curve

علماً بأنه لن تؤثر زيادة field excitation على جهد الشبكة لأن جهد الشبكة ثابت. والعكس بالعكس.

ملحوظة:

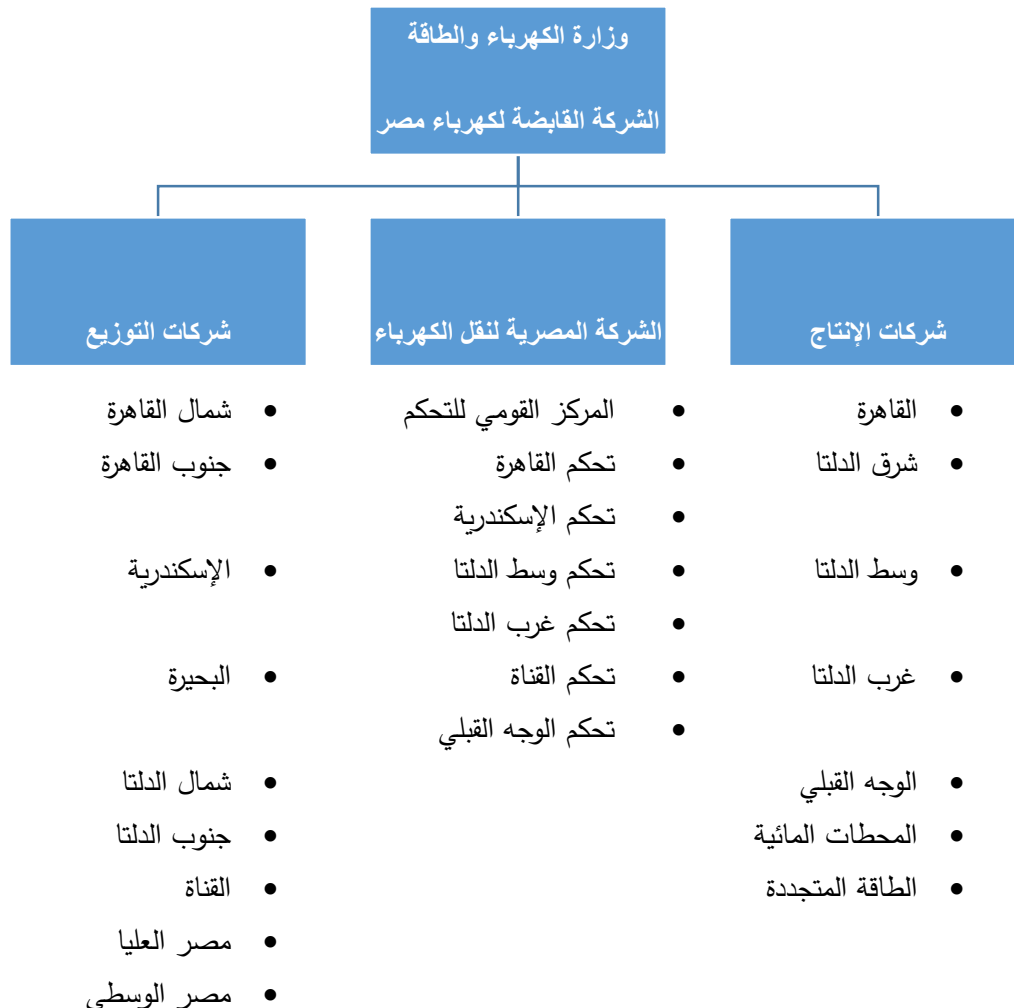
استخدام معوضات القدرة غير الفعالة سيحسن بشكل كبير المنحنى السابق حيث يمكن الحصول على قدر أكبر من الـ Q دون حدوث تغييرات كبيرة في الـ P. وسيدرس ذلك تفصيلاً في الباب الثاني من هذا الكتاب.

ملحق-1:

معلومات إضافية عن الشبكة المصرية

منظومة الكهرباء في مصر

تتكون منظومة الكهرباء في مصر من ست شركات لإنتاج الكهرباء وشركة واحدة لنقل الطاقة وتسع شركات لتوزيع الكهرباء كما في المخطط التالي. وجميعهم يتبعون الشركة القابضة لكهرباء مصر التي تتولى مسؤولية توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية.



ويقوم المركز القومي للتحكم في الطاقة (ومقره مدينة سقيل التابعة للوراق - بالجيزة) بالإضافة إلى ستة مراكز تحكم إقليمية (شكل 1-25) (تحكم القاهرة - تحكم الإسكندرية - تحكم وسط الدلتا - تحكم غرب الدلتا - تحكم

القناة - تحكم الوجه القبلي) بدور أساسي في التحكم في الطاقة الكهربائية من لحظة توليدها وحتى تصل إلى مستهلكها أخذاً في الاعتبار أمان واستمرارية واقتصاديات التشغيل.

فالمستوى الأول من التحكم في الطاقة هو الخاص بمركز التحكم القومي ، وهو المركز الوحيد الذي يمكنه المراقبة و التحكم في محطات التوليد بالإضافة للتحكم في محطات التحويل الموجودة على شبكة الـ 500kV ، أو الموجودة على شبكة الـ 220kV.

أما المستوى الثاني من التحكم فيشمل مراكز التحكم الإقليمية ، وهذه لها القدرة على المراقبة والتحكم في فصل وتشغيل المحطات جهد 66kV أو أقل ، لكن لا يمكن لهذه المراكز الإقليمية فصل أو تشغيل أى محطة في شبكة الـ 500kV أو شبكة الـ 220kV.

ثم المستوى الثالث ويشتمل على مراكز تحكم في شبكات التوزيع بالمدن . و تتبع مراكز التحكم الإقليمية السبعة السابقة.

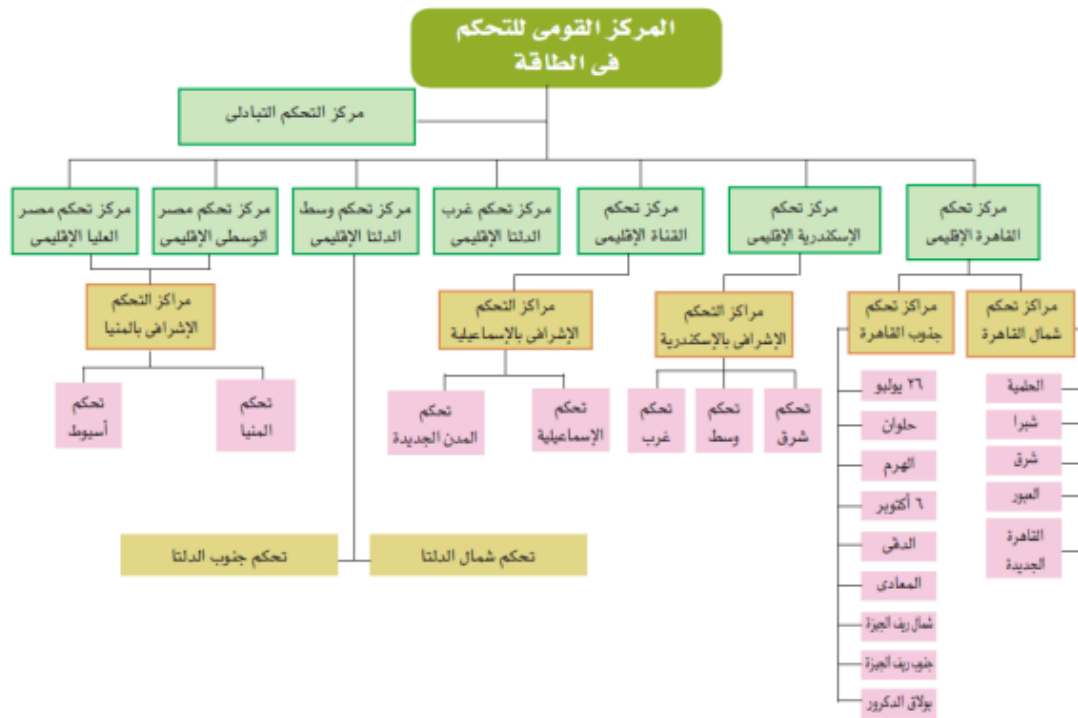


Figure 1-25 مراكز التحكم في مصر

تطور الحمل الكهربى على الشبكة :

لا يسير الطلب على الكهرباء بمعدل ثابت يومياً أو أسبوعياً أو شهرياً أو فصلياً ، فالطلب على الكهرباء يتأثر بنوع الأحمال ، من حيث كونه صناعياً أو زراعياً أو تجارياً أو منزلياً ، كما يتأثر بالأحوال الجوية و درجات

الحرارة صيفاً و شتاءً ، و يتأثر بالمناسبات المختلفة كالأجازات و الأعياد ، و بالمواسم كشهر رمضان مثلاً ، كما يتأثر باختلاف الوقت على مدى اليوم ليلاً و نهاراً .

و يعد الحمل الأقصى في السنة أحد المؤشرات الهامة لتطور استهلاك الكهرباء ، و يجب أن تكون منظومة الكهرباء مصممة للاستجابة لذروة الأحمال .

ملحوظة :

يعتبر الرقم الممثل لنصيب الفرد من الطاقة الكهربائية أحد مقاييس ارتفاع مستوى المعيشة في البلاد ، ويساوي هذا الرقم في مصر تقريباً 1830 kWh للفرد سنوياً (إجمالي الطاقة المولدة في 2014 = 164836 جيجا وات ساعة فإذا قسمنا هذا الرقم على 90 مليون فرد = 1830kWh) . وهذا أقل من المعدل العالمي الذي يبلغ 2800 ك وات ساعة للفرد.

والجدول 1-3 يعطى إحصائية من البنك الدولي بمتوسط استهلاك الكهرباء السنوي لكل فرد kWh/person في بعض الدول.

Table 1-3

الدولة	2011	2012
إثيوبيا	56	57
أذربيجان	1,705	2,053
أرمينيا	1,752	1,832
أروبا		
إريتريا	60	62
إسبانيا	5,599	5,573
أستراليا	10,712	10,398
إستونيا	6,314	6,689
إسرائيل	6,930	7,189
أفغانستان		
إكوادور	1,219	1,282
الأرجنتين	2,901	2,955
الأردن	2,289	2,357
الإمارات العربية المتحدة	10,537	10,463
ألبانيا	2,195	2,118
البحرين	17,093	17,395
البرازيل	2,394	2,462
البرتغال	4,848	4,736

654	657	جمهورية كوريا الديمقراطية الشعبية
		جمهورية لاو الديمقراطية الشعبية
1,700	1,701	جمهورية مصر العربية
3,690	3,895	جمهورية مقدونيا يوغوسلافية السابقة
4,405	4,606	جنوب أفريقيا

تطور نمو الطلب في مصر

يمكن تقسيم النمو في الحمل الأقصى في مصر تاريخياً (وبالتالي نمو القدرة الكهربائية المركبة) إلى ثلاث مراحل:

المرحلة الأولى 1952 – 1970 : حيث بلغ معدل الزيادة السنوية في الحمل الأقصى في بدايات هذه المرحلة حوالي 12 ، 3% .

المرحلة الثانية 1970 – 1985 : لم يزد معدل زيادة الحمل الأقصى في الفترة بين (1970-1971)- (1973-1974) عن 4 ، 4% سنوياً بسبب ظروف الحرب ، إلا أنه في العقد الثاني (1985-1974) زاد الحمل الأقصى أكثر من ثلاث مرات بمعدل زيادة قدره 5% سنوياً ، و قد اقترن ذلك بفترة النمو غير العادي في التوليد الكهربائي ، و الذي اقترن بالنمو غير العادي في إنتاج البترول و الغاز الطبيعي و اعتمد عليه اعتماداً شبيه مطلق و قد بلغ معدل الزيادة في الحمل الأقصى طوال المرحلة الثانية حوالي 4% سنوياً .

المرحلة الثالثة 1985 – حتى الآن : استمر فيها تزايد الحمل الأقصى وإن كان بمعدلات أقل بكثير من المرحلة السابقة حيث ارتفع الحمل الأقصى من 5361 ميغاوات عام 1985-1986 إلى 9850 ميغاوات عام 1997-1998 ، بمعدل زيادة قدره 2% سنوياً ، واستمرت معدلات الزيادة حتى وصل إلى ما يقرب من 30000 ميغاوات في 2015.

و قد حدث في هذه المرحلة تغيير دراماتيكي وتاريخي في نمط الأحمال عما كان في المرحلتين السابقتين ، فقد كان الحمل الأقصى دائماً يحدث في الشتاء في فترة ما قبل الثمانينيات نظراً لطول ساعات الليل وما يتبع ذلك من استخدام أكبر للإنارة سواء في المنازل أو الشوارع أو المحلات التجارية أو المصانع...إلخ ، ولكن منذ أوائل الثمانينيات ومع تزايد تركيب أجهزة التكييف في المنازل أصبح الحمل الأقصى يحدث صيفاً وتزايد بمعدلات عالية حتى وصل كما ذكرنا إلى ما يقرب من 30000 ميغا وات في 2015.

وكان أقصى حمل للشبكة في مصر هو 28750 ميغاوات.(2015) . والشكل 1-26 يوضح توزيع الأحمال على ساعات اليوم . واضح أن الحمل الأقصى في حدود التاسعة مساءً ، وبالطبع هذا التوقيت يختلف من دولة لأخرى حسب الظروف المناخية ، فالكويت مثلاً يحدث فيها الحمل الأقصى في الفترة من 2 ظهراً إلى السادسة مساءً حيث تصل درجة الحرارة صيفاً إلى فوق الخمسين درجة مئوية.

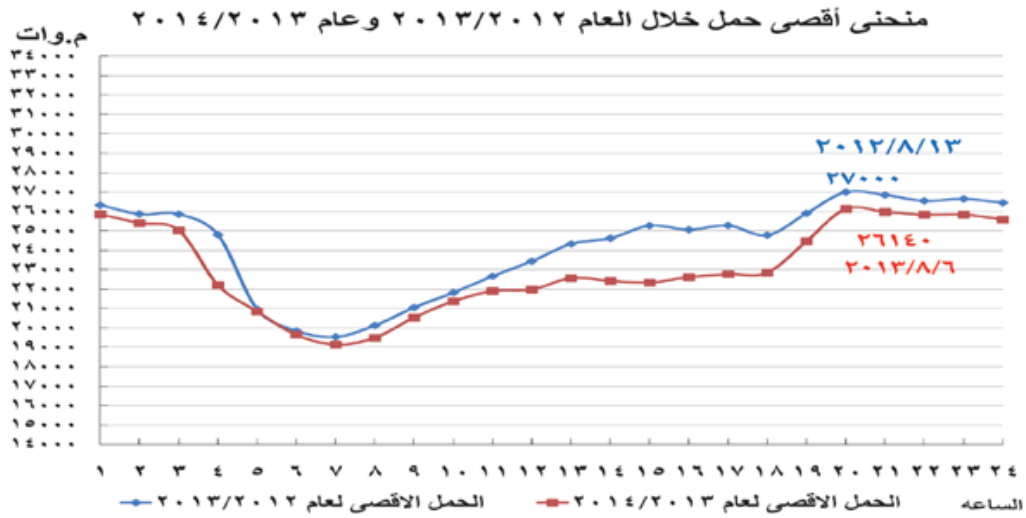


Figure 1-26 منحنى الحمل اليومي في اليوم الذي حدث فيه أقصى تحميل (سنة 2012 و 2013)

ملحوظات:

- 1- نمط توزيع الأحمال يعطى تصورا للأنشطة الاقتصادية بالدولة ، ففي معظم دول العالم المتقدم تكون الأحمال الصناعية فيها أكبر من السكنية ، لكن للأسف لدينا في مصر 43% أحمال سكنية مقارنة بحوالي 27% أحمال صناعية (والباقي تجارية وخدمات عامة كما في الشكل 1-27).

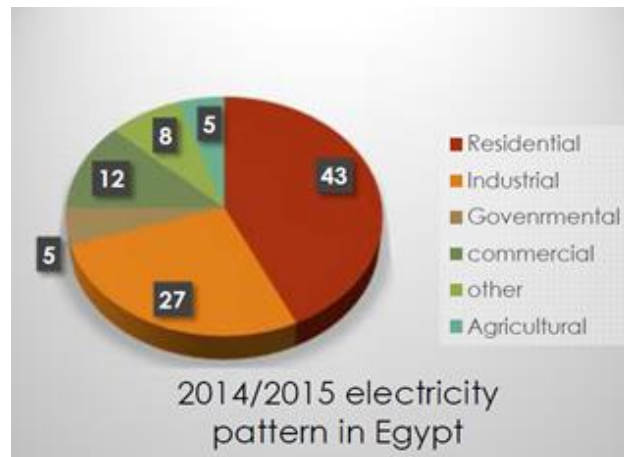


Figure 1-27 نمط توزيع الأحمال في مصر

- 2- إذا استمر نمو الأحمال بهذا المعدل فلن يكون هناك حل سوى إنشاء محطات نووية مع التوسع في استخدامات الطاقة الجديدة و المتجددة لسد العجز في الكهرباء ، فالطاقة النووية هي الوحيدة القادرة على الإنتاج الكثيف بكميات محدودة من الوقود (الوقود النووي هنا) ، فالطاقة المحررة

من كيلو جرام واحد من الفحم يمكن أن تنتج 8 كيلو وات ساعة ، أما الطاقة الناتجة من كيلو جرام واحد من اليورانيوم 235 ، فيمكن أن تنتج ما يقارب 24 مليون كيلو وات ساعة.

3- لابد أن نأخذ في الاعتبار أن هناك احتمالاً كبيراً لحدوث فقر مائي في مصر (سواء بسبب سد النهضة الأثيوبي أو بسبب الزيادة السكانية) وهذا قد يستلزم اللجوء لتحلية ماء البحر ، وبالطبع هذه العملية ستستهلك طاقة كهربائية إضافية وحمل كهربى جديد لم يكن يوماً في الحسبان ، فتحلية المتر المكعب من الماء تحتاج لحوالى 4 kWh ، وهذا يعنى أن تحلية 40 بليون متر مكعب من الماء (النقص المتوقع حتى 2030) يحتاج لطاقة كهربائية تعادل تقريباً كل الطاقة الكهربائية المتاحة الآن في مصر !!!!. بمعنى آخر أن من يفكر في تحلية الماء عليه أولاً أن يضاعف الطاقة الكهربائية المنتجة .

محطات التوليد المتصلة بالشبكة الموحدة المصرية

جميع محطات التوليد في مصر بمختلف أنواعها (مائية ، بخارية ، هوائية إلخ) مرتبطة بالشبكة الموحدة ونسب مشاركة كل نوع يظهر في الجدول 1-4:

تنوع مصادر الطاقة في مصر Table 1-4

البيان	%إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة
الطاقة المائية	7.94
طاقة الرياح	0.79
الطاقة الشمسية	0.07
كهرباء مولدة من المحطات الحرارية المربوطة بالشبكة	91.02
كهرباء مولدة من المحطات الغير مربوطة بالشبكة	0.14
كهرباء مشتراة من فائض الشركات الصناعية	0.04

وهذه نبذة عن بعض المحطات المستخدمة في توليد الكهرباء في مصر:

1- محطة كهرباء السد العالي 12x175 MW

- تعتبر محطة كهرباء السد العالي واحدة من أكبر محطات التوليد الكهرومائية في العالم.
- تشمل المحطة 12 وحدة قدرة كل منها 175 MW.

2- محطة الكريمات : هناك أربع محطات في منطقة الكريمات :

- **محطة الكريمات :** وهي تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية ، قدرة كل واحدة 627 ميجاوات بإجمالي قدرة 1254 ميجاوات ، والوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.
- **محطة الكريمات المركبة 1 :** و تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميجاوات ، بإجمالي قدرة 750 ميجاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار.
- **محطة الكريمات المركبة 2 :** وهي تحتوي على عدد 2 وحدة غازية قدرة كل واحدة 250 ميجاوات وعدد 1 وحدة بخارية قدرتها 250 ميجاوات بإجمالي قدرة 750 ميجاوات و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي وسولار.
- **محطة الكريمات الشمسية :** وفيها 20 ميجاوات هو قدرة الجزء المعتمد على الطاقة الشمسية في التسخين ، إلى جانب 120 ميجاوات هي قدرة الجزء الحراري العادي .

- 3- **محطة مرسى مطروح البخارية :** و تحتوي على عدد 2 وحدة بخارية قدرة كل منهما 30 ميجاوات ، بإجمالي قدرة 60 ميجاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.
- 4- **محطة كفر الدوار البخارية :** وهي تحتوي على عدد 4 وحدة بخارية ، قدرة كل منهما 110 ميجاوات ، بإجمالي قدرة 440 ميجاوات ، و الوقود المستخدم هو مازوت وغاز طبيعي.
- 5- **محطة كهرباء النوبارية :** هناك منطقتان لتوليد الكهرباء في النوبارية. هما :

- **النوبارية المركبة (1و2) :** وهي تحتوي على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما (عدد 4 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بنظام الدورة المركبة بقدرة 250 ميجاوات) بإجمالي قدرة مركبة 1500 ميجاوات ، و الوقود المستخدم غاز طبيعي وسولار.
- **النوبارية المركبة 3 :** وهي تشتمل على عدد 2 نموذج يتضمن كل منهما (عدد 1 وحدة غازية قدرة كل منهما 250 ميجاوات إلى جانب عدد 2 وحدة بخارية بقدرة 250 ميجاوات بنظام الدورة المركبة) بإجمالي قدرة مركبة 750 ميجاوات ، و الوقود المستخدم هو غاز طبيعي و سولار

6- محطة الزعفرانة : تشتمل المحطة على عدد 105 ترينة هوائية (شكل 1-28) ، قدرة كل واحدة 0.6 ميجاوات ، إلى جانب عدد 117 ترينة هوائية قدرة كل منهما 0.66 ميجاوات ، إلى جانب عدد 478 ترينة هوائية قدرة كل منهما 0.85 ميجاوات ، بإجمالي قدرة 547 ميجاوات.

المحطات المائية في مصر

1- محطة كهرباء السد العالي

يُمثل توليد الكهرباء من السد العالي في مصر حوالي من 6 ٪ من إجمالي الطاقة بمصر ، وكان هذا الرقم منذ سنوات يصل إلى 40% لكن مع التوسع في بناء المحطات الغازية والبخارية انخفضت النسبة.

- تعتبر محطة كهرباء السد العالي (شكل 1-28) واحدة من أكبر محطات التوليد الكهرومائية في العالم.
- تشتمل المحطة 12 وحدة قدرة كلها منها 175 MW ، وجهد التوليد هو 15.75kV ، ويتم نقل الطاقة الكهربائية المولدة من وحداتها إلى مراكز الأحمال على خطوط جهد 500 kV و 220 kV.



السد العالي في مصر Figure 1-28

- أقصى طاقة مولدة سنوياً 10000 مليون ك.و.س.
- السد العالي عبارة عن سد ركامي طوله عند القمة 3830 مترا منها 520 مترا بين ضفتي النيل ويمتد الباقي على هيئة جناحين على جانبي النهر ، ويبلغ ارتفاع السد 111 مترا فوق منسوب قاع نهر النيل وعرضه عند القمة 40 مترا.

2- محطة كهرباء أسوان الأولى

- بدأ العمل في مشروع محطة كهرباء أسوان الأولى عام 1956 .
- تشتمل المحطة على سبع وحدات بقوة 46 ميجاوات لكل وحدة والتي انخفضت إلى 40 ميجاوات بعد بناء السد العالي .
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1750 مليون ك.و.س.

3- محطة كهرباء أسوان الثانية 4 x 67.5 ميجاوات

- المحطة تضم 4 وحدات بقدرة 67.5 ميجاوات لكل وحدة.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 1800 مليون ك.و.س.

4- محطة كهرباء إسنا

- هي أول محطة كهرباء مائية أنشئت شمال مدينة أسوان لاستغلال مساقط النيل عند إسنا ، و ذلك ضمن مشروع قناطر إسنا الجديدة.
- تضم المحطة 6 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 14.28 ميجا وات ، و قدرة إجمالية 85.68 ميجاوات ، و قد بدأت وحداتها في الدخول على الشبكة الموحدة في يولييه عام 1993 م.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 643 مليون ك.و.س.

5- محطة كهرباء نجع حمادي

- تضم المحطة 4 وحدات توليد قدرة الواحدة منها 16 ميجاوات.
- أقصى طاقة مولدة سنوياً 470 مليون ك.و.س.

6- محطة كهرباء أسيوط

محطة توليد كهرباء مائية عند قناطر أسيوط ، و تم افتتاحها في 2013.

والجدول 1-5 يبين أسماء وقدرات كل محطات التوليد في مصر .

محطات التوليد في مصر وقدراتها التفصيلية Table 1-5

شركات الانتاج	اسم المحطة	بيان الوحدات	إجمالي القدرة الاسمية م.و.	نوع الوقود المستخدم	تاريخ التشغيل التجاري
القاهرة	شبرا الخيمة (ب)	310X4	1260	مازوت - غاز طبيعي	1988-80-84
	شبرا الخيمة (غ)	30X1	30	غاز طبيعي - سولار	1986
	توسيع غرب ⁽¹⁾ (ب)	350-X2 + 330-X2	1360	مازوت - غاز طبيعي	2011-1990
	جنوب القاهرة المركبة 1	60-X2 + 110-X2	450	مازوت - غاز طبيعي	1989-1960
	جنوب القاهرة المركبة 2	50X1 + 110-X1	160	غاز طبيعي	1990
	شمال القاهرة المركبة	250-X2 + 250-X4	1000	غاز طبيعي-سولار	2008-2006/2000-2004
	التين (ب)	350-X2	700	مازوت - غاز طبيعي	2010
	وادي حوف (غ)	33,3X3	100	غاز طبيعي - سولار	1980
	6 أكتوبر ⁽²⁾ (غ)	150-X4	600	غاز طبيعي-سولار	2012
	دمياط المركبة	136X2 + 132X6	1200	غاز طبيعي - سولار	1993-1989
شرق الدلتا	متنافة (ب)	300-X2 + 150-X2	900	مازوت - غاز طبيعي	1987-87-80
	ابوسلطان (ب)	150-X4	600	مازوت - غاز طبيعي	1987-84-83
	الشباب (غ)	33,0X3	100,0	غاز طبيعي - سولار	1982
	الشباب الغازية الجديدة (غ)	120X8	1000	غاز طبيعي-سولار	2011
	دمياط الغازية الجديدة (غ)	120X4	500	غاز طبيعي-سولار	2011
	غرب دمياط ⁽³⁾ (غ)	120X4	500	غاز طبيعي-سولار	2012
	بور سعيد ⁽⁴⁾ (غ)	23,96X2	48	غاز طبيعي - سولار	1977
	العريش (ب)	33X2	66	مازوت- غاز طبيعي	1996-90
	عين موسى (ب)	320-X2	640	مازوت - غاز طبيعي	2001
	شرم الشيخ ⁽⁵⁾ (غ)	24,27X4 + 33,7X1 50X2 + 50,8X4 +	104	سولار	1997-79-70
وسط الدلتا	الفردقة (غ)	24,2X6	143	سولار	1979-1977
	الزعفرانة (رياح)	0,66X1170 + 0,6X100 0,80X478 +	547	رياح	2010-2009-2008-2007
	قطاع خاص				
	خليج السويس (ب)	241,20X2	682,0	مازوت - غاز طبيعي	2002
	شرق بورسعيد (ب)	241,20X2	682,0	مازوت - غاز طبيعي	2003
	طلخا المركبة	45,94X2 + 24,72X8	290	غاز طبيعي - سولار	1989-80-79
	طلخا 210 توسيع (ب)	210-X2	420	مازوت - غاز طبيعي	1990-1993
	طلخا 750 المركبة	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010-2006
	النويارية المركبة 2,1	250-X2 + 250-X4	1000	غاز طبيعي - سولار	2006-2000
	النويارية المركبة 3	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010-2009
غرب الدلتا	المحمودية المركبة	58,77X2 + 250X8	316	غاز طبيعي - سولار	1990-1983
	العطف المركبة	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي - سولار	2010-2009
	قصر الدوار (ب)	110-X4	440	مازوت - غاز طبيعي	1986-84-80
	دمنهوور توسيع (ب)	300-X1	300	مازوت - غاز طبيعي	1991
	دمنهوور (ب)	60X3	190	مازوت - غاز طبيعي	1969-68
	دمنهوور المركبة	58X1 + 250X4	108	غاز طبيعي - سولار	1990-1980
	السيوف (غ)	33,3X6	200	غاز طبيعي - سولار	1984-83-82-81
	كرموز (غ)	11,28X1 + 11,27X1	23,0	سولار	1980
	ابوقير (ب)	311X1 + 150-X4	911	مازوت - غاز طبيعي	1991-84-83
	ابوقير (غ)	24,27X1	24	غاز طبيعي - سولار	1983
الوجه القبلى	ابوقير الجديدة ⁽¹⁾ (ب)	60-X2	1300	غاز طبيعي - مازوت	2012-2012
	سبدي كرير 1 (ب)	320-X2	640	مازوت - غاز طبيعي	2000-1999
	سبدي كرير المركبة (ب)	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي-سولار	2010
	مطروح (ب)	30-X2	60	مازوت - غاز طبيعي	1990
	قطاع خاص				
	سبدي كرير 4,3 (ب)	341,20X2	682,0	مازوت- غاز طبيعي	2001
	الوليدية (ب)	312X2	624	مازوت	1997-1992
	الكريسات (ب)	637X2	1254	مازوت - غاز طبيعي	1998-1997
	الكريسات المركبة (1) (ب)	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي - سولار	2009-2007
	الكريسات المركبة (2) (ب)	250-X1 + 250-X2	750	غاز طبيعي - سولار	2011-2009
المحطات المائية	اسيوط (ب)	30-X3	90	مازوت	1967-1966
	الكريسات الشمسية/ الحرارية	20X1 + 50X1 + 70X1	140	شمس- غاز طبيعي	2011
	السد العالي	170X12	2100	مائي	1967
	خزان اسوان (1)	40-X7	280	مائي	1960
	خزان اسوان (2)	67,0X4	270	مائي	1986-1980
	اسنا	14,28X6	86	مائي	1993
	نجع حمادي	16X4	64	مائي	2008

2

محطات التوليد الحرارية

هناك أربعة أنواع رئيسية لهذه المحطات :

1. المحطات البخارية
2. المحطات الغازية البسيطة
3. المحطات الغازية المركبة
4. محطات الديزل

وفي مصر يمكن اعتبار النوع الأول (البخارية) هو الأهم والأضخم ضمن منظومة التوليد ، أما الغازية بنوعها (بسيطة ومركبة) فهي الأكثر انتشارا ، (عدد المحطات البخارية : 17 ، الغازية المركبة : 14 ، الغازية البسيطة : 17) ، بالإضافة إلى المحطات الصغيرة الموجودة على شبكات التوزيع جهد 22 kV و 11 kV لضبط الجهود.

و المحطة البخارية تتداخل فيها مكونات تنتمي لثلاثة أقسام (ميكانيكى وكيميائى وكهربى) .

وهذا الفصل مقسم إلى جزئين:

- الجزء الأول ، وفيه ندرس بالتفصيل المحطات البخارية (القسمين الميكانيكى والكيميائى فقط).
- الجزء الثانى ، يخصص للأنواع الثلاثة الباقية من أنواع المحطات الحرارية (الغازية البسيطة و الدورة المركبة ومحطات الديزل).

أما القسم الكهربى فى المحطات الكهربائية عموما فنخصص له الفصل التالى مباشرة (الثالث).

علما بأنه يمكن تصنيف المحطات النووية على أنها محطات بخارية ، ولكن حيث أن مصدر الحرارة فيها مختلف تماما عن الأنواع السابقة لذا سنفرد لها فصلا خاصا وهو الفصل الرابع.

الجزء الأول من الفصل الثاني

محطات التوليد البخارية

تسمى هذه المحطات بمحطات توربينات البخار لاعتمادها على ضغط البخار لتحريك التوربينات. وتستعمل هذه المحطات أنواعا مختلفة من الوقود حسب الأنواع المتوفرة ، مثل الفحم الحجري أو البترول السائل أو الغاز الطبيعي أو الصناعي .

تمتاز المحطات البخارية بكبر مساحتها وكبر حجم إنتاجها (يمكن أن تنتج الوحدة الواحدة 600 ميجا وات) ، وتتميز أيضا برخص تكاليفها مقارنة بإمكاناتها الضخمة ، وعمرها الافتراضي الكبير ، كما تمتاز بإمكانية استعمالها لتحلية المياه المالحة ، الأمر الذي يجعلها ثنائية الإنتاج خاصة في البلاد التي تقل فيها مصادر المياه العذبة.

ولكن أبرز عيوبها أن تكلفة الإنشاء عالية ، وأنها تحتاج لمساحة كبيرة ، إضافة إلى بطء دخولها على الشبكة (5-7 ساعات) .

2.1 أساسيات المحطات البخارية

تعتمد محطات التوليد البخارية على استعمال نوع الوقود المتوفر ، وحرقة في أفران خاصة لتحويل الطاقة الكيميائية في الوقود إلى طاقة حرارية في اللهب الناتج من عملية الاحتراق ، ثم استعمال الطاقة الحرارية في تسخين المياه في غلايات خاصة (Boilers) لتحويل الماء المقطر إلى بخار في درجة حرارة وضغط مرتفعين (تصل درجة الحرارة إلى 540 درجة وقيمة الضغط 160 بار) ، ثم يتم تسليط هذا البخار على ريش توربينات بخارية صممت لهذه الغاية ، فيقوم البخار المندفع بتدوير محور التوربينات ، وبذلك تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية على محور هذه التوربينات .

يرتبط عمود المولد الكهربائي ربطا مباشرا مع عمود التوربينات البخارية فيدور الجزء الدوار في المولد الذي يسمى بالـ Rotor – وهو الذي يحمل منظومة المجال المغناطيسي للمولد – Electric field بنفس سرعة دوران التربينه ، فيقطع هذا المجال ملفات الجزء الثابت (Stator) ، وبذلك تتحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية .

لا يوجد فوارق أساسية بين محطات التوليد البخارية التي تستعمل أنواعا مختلفة من الوقود إلا من حيث طرق نقل وتخزين وتداول وحرق الوقود . وقد كان استعمال الفحم الحجري شائعا في أواخر القرن الماضي وأوائل هذا القرن ، إلا أن اكتشاف واستخراج البترول ومنتجاته أحدث تغييرا جذريا في محطات التوليد الحرارية ، حيث أصبح يستعمل بنسبة تسعين بالمئة لسهولة نقله وتخزينه وحرقه سواء كان بصورة وقود سائل أو غازي .

وقد يبدو غريبا أن الفحم لا يزال يستخدم عالمياً على نطاق واسع في توليد الكهرباء ، ففي بريطانيا يسهم الفحم بأكثر من الثلث في توليد الطاقة الكهربائية ، وتبلغ هذه النسبة نحو 50% في الولايات المتحدة ، 59% في الهند ، ونحو 78% في الصين . ولكن يجب ملاحظة أن السبب في ارتفاع نسبة استخدام الفحم في هذه الدول تحديداً هو أن لديها احتياطات ضخمة جداً من الفحم.

ملحوظة:

توجد مشكلتان أساسيتان لاستخدام الفحم في مصر .

- أولاً أن الفحم حتى الآن لا يمثل أكثر من 1% من إجمالي مصادر الطاقة في مصر (مصدره الأساسي في مصر من منجم المغارة بسياء).
- ثانياً. الفحم كمصدر للوقود هو من أكثر المصادر تلويثاً للبيئة ، والبيئة في مصر ملوثة بشكل لا يحتمل المزيد ، فإنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها انبعاث 1041 طن من CO_2 .

2.1.1 ملخص الدورة البخارية

يمكن مبدئياً متابعة هذه الدورة بصورة مبسطة من خلال الشكل 1-2 الذي يمثل محطة في ولاية جورجيا بأمريكا. وكما هو واضح في الشكل ، فإن مصدر الطاقة الأساسية في هذا المثال تحديداً هو الفحم ، الذي يحترق بالغلاية لإنتاج الحرارة المستخدمة في إنتاج البخار الذي يندفع لتدوير التربينات ، التي تتصل بالمولد كما ذكرنا سابقاً. ويظهر بالشكل بعض المكونات المساعدة لإتمام هذه الدورة مثل المكثف الذي يدخل عليه البخار الخارج من التربينات فيتكثف ويتحول لماء مرة أخرى لبدء دورة جديدة. كما يظهر برج التبريد الذي يستخدم في عملية التكثيف السابقة ساحبا الماء من النهر الموجود هناك.

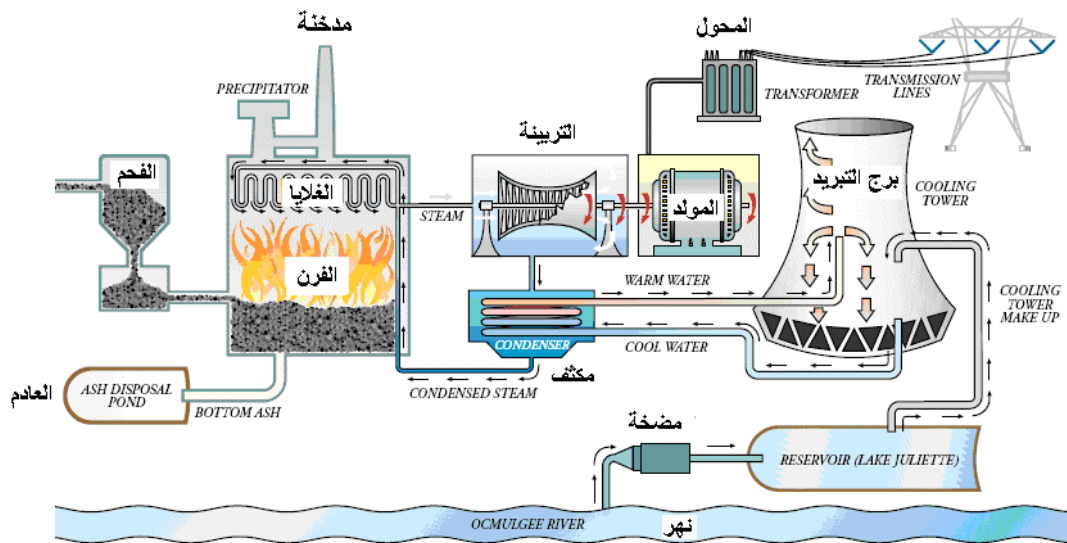


Figure 2-1 مكونات محطة توليد بخارية تعمل بالفحم

أما الدورة التفصيلية فنعرضها لاحقاً بعد شرح مكونات المحطة.

2.1.2 اختيار مواقع المحطات البخارية

يتحكم في اختيار المواقع المناسبة لمحطات التوليد الحرارية عدة عوامل مؤثرة نذكر منها:

1. القرب من مصادر الوقود وسهولة نقله إلى هذه المواقع وتوفر وسائل النقل الاقتصادية .
2. القرب من مصادر مياه التبريد لأن المكثف يحتاج إلى كميات كبيرة من مياه التبريد .
لذلك تبنى هذه المحطات عادة على شواطئ البحار أو بالقرب من الأنهار .
3. القرب من مراكز استهلاك الطاقة الكهربائية لتوفير تكاليف إنشاء خطوط النقل . ومراكز الاستهلاك هي عادة المدن والمناطق السكنية والمجمعات التجارية والصناعية.



2.1.3 كفاءة المحطات البخارية

العيب الرئيسي لهذه المحطات هو انخفاض كفاءتها ، ويمكن توقع أو استنتاج ذلك بطريقتين :
الأولى من خلال دراسة مخطط المحطة والتي يلخصها الشكل 2-2 ، ومنه يتضح حجم الطاقة المفقودة سواء في الهواء الساخن الناتج عن حرق الوقود ، أو خلال المكثفات التي تسترجع البخار لحالته السائلة تمهيدا لإعادة الدورة من جديد.

السبب الثانى يرجع لطبيعة الآلات الحرارية ، حيث نستنتج منه أن الكفاءة الحرارية للمحطة تساوى :

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100$$

حيث T_1 درجة حرارة البخار الداخل و T_2 درجة حرارة البخار الخارج (كلاهما بمقياس كلفن) ، وحيث أنه حرارة الغازات الخارجة لا يمكن أن تكون أقل من حرارة الهواء الخارجى المحيط (لاعتبارات تخص القانون الثانى للديناميكا الحرارية) ، وحرارة الغازات الداخلة لا يمكن أن تتجاوز 550 درجة مئوية لاعتبارات تصنيفية ، فبالتعويض فى المعادلة السابقة نجد أن أعلى كفاءة نظرية لا تتجاوز 64%.

$$T_2 = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad \blacktriangleright$$

$$T_1 = 550 + 273 = 823 \text{ K} \quad \blacktriangleright$$

$$\text{Efficiency} = ((1 - 293/823) * 100 = 64.4 \% \quad \blacktriangleright$$

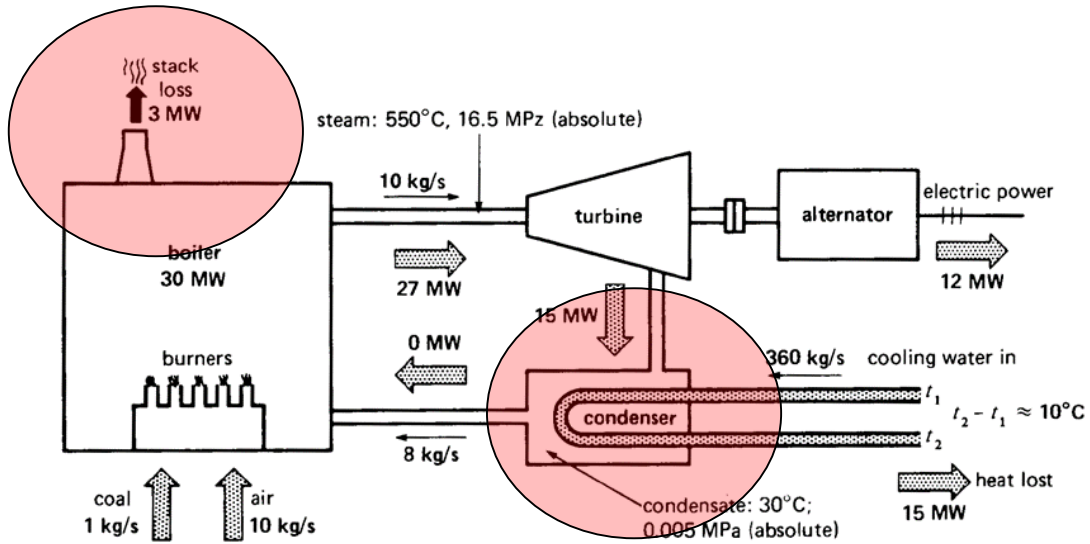


Figure 2-2 أسباب انخفاض كفاءة محطات التوليد البخارية

2.1.4 الأقسام الرئيسية بالمحطات البخارية

تعتمد فكرة توليد الكهرباء في المحطات البخارية على التكامل بين أقسام المحطة الأساسية:

1. القسم الكيميائي المسئول أساساً عن تجهيز ومراقبة منظومة المياه المستخدمة في الدورة البخارية.
2. القسم الميكانيكي المسئول عن تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية بتدوير التربينات التي ستقوم بتدوير المولد.
3. القسم الكهربائي المسئول عن تحويل الطاقة الميكانيكية (الحركية) إلى طاقة كهربائية.

فيما يلي نشرح بالتفصيل مهام القسمين الكيميائي والميكانيكي في المحطات البخارية. أما الجزء الكهربائي فيدرس لاحقاً بالتفصيل في الفصل الثالث.

القسم الكيميائي في المحطات البخارية

2.2 القسم الكيميائي في المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو إمداد جميع مرافق المحطة وبالأخص الغلاية بالماء النقي الذي تصل درجة نقائه إلى 99.5% بحيث يكون هذا الماء خاليا تماماً من الشوائب والأملاح حتى لا يؤثر على كفاءة الغلاية والتربينة ، لأن هذه الشوائب تؤدي إلى تآكل (نحر) ريش التربينة مما يؤدي إلى انخفاض العمر الافتراضي لريش التربينة ، ومن ثم تقليل الكفاءة العامة للمحطة. وتتضح أهمية هذا القسم في مشكلة محطة توليد معروفة بمصر والتي تسبب ارتفاع نسبة الأملاح والشوائب في البخار في إخراج وحدة توليد كاملة منها بعد سنة واحدة من بداية تشغيل المحطة.

وهذا القسم في دول الخليج يكتسب أهمية خاصة لأنه ليس فقط مسئولاً عن توفير المياه المقطرة للمحطة ولكنه أيضاً مسئولاً عن إنتاج مياه عذبة للشرب ، ففي دول الخليج لا يوجد أنهار ، والمصدر الوحيد لمياه الشرب هو تقطير مياه الخليج العربي بواسطة وحدات التقطير distillation units ، ولعلك لا تستغرب إذا علمت أن ثلث الطاقة الكهربائية المولدة هناك في محطات الكهرباء تستهلك مرة أخرى داخل المحطة لإنتاج مياه عذبة بالتقطير (وزارة الكهرباء هناك تسمى دائماً وزارة الكهرباء والماء ، وأعتقد الآن أن السبب صار واضحاً لهذه التسمية) .

2.2.1 نظرية عمل القسم الكيميائي:

يتم سحب الماء من النهر بواسطة طلمبات سحب المياه ، وبالطبع فهذه المياه تحتوي على كميات هائلة من الشوائب التي تتمثل في الأغصان والأسماك والطين والأملاح ، فيتم التخلص أولاً من الأغصان والأسماك عن طريق بعض الشبكات المعدنية ثم يتم التخلص من الطين عن طريق المرشحات ، أما المشكلة الكبرى فتتمثل في الأملاح التي تنقسم إلى جزئين (أملاح ذائبة و أملاح غير ذائبة).

فأما الأملاح الذائبة فيتم التخلص منها عن طريق إضافة بعض المكونات الكيميائية لتحويلها إلى أملاح غير ذائبة وهي التي يتم التخلص منها بعد ذلك عن طريق المرشحات Filters الكيميائية .

وأما الشوائب غير الذائبة فهي غالباً تكون عبارة عن أكاسيد المعادن الناتجة عن تآكل المواد المصنوع منها المكثف و مواسير التغذية وهذه يسهل التخلص منها باستخدام الـ Filters.

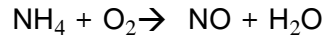
2.2.2 ما هو الرقم الهيدروجيني PH ؟

هو بالإنجليزية (power of hydrogen or pH) وهي المقياس الذي يحدد ما إذا كان السائل حمضاً أم قاعدة أم متعادلاً.

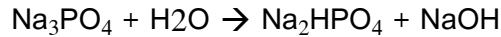
- فتعتبر السوائل التي لها درجة PH أقل من 7 أحماضا مثل عصير الليمون (2.4) ، الكولا (2.5) ، الخل (2.9) ، الحليب (6.5) . لاحظ حامضية الحليب مرتفعة ، لذا فالشخص الذى يعانى من حموضة فى المعدة ينصح بعدم تناول الحليب .
- وتعتبر السوائل التي لها درجة PH أعلى من 7 محلولاً قلويًا أو قواعد. مثل ماء البحر (7.7) وصابون اليد (9) .
- أما درجة الـ PH = 7 فهي تعتبر متعادلة ، وهي تساوي حموضة الماء النقي عند درجة حرارة 25 مئوية.

2.2.3 تحسين معامل الـ PH للماء

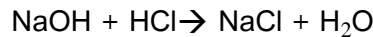
وتتم معالجة مياه التغذية عن طريق إضافة مادة قلوية للماء (غالباً النشادر NH_4) لجعل الـ PH للمياه يساوى تقريباً (9.2→9) ، و عندها يقل معدل التآكل ، وبالتالي تقل الشوائب. وتعتبر النشادر أكثر القلويات استخداماً في هذه العملية نظراً لقلّة تكلفتها واستقرارها عند درجات الحرارة المرتفعة. حيث تتفاعل الأمونيا مع الأكسجين و تمنع تكون أكاسيد المعادن و بالتالي يقل معدل التآكل.



وتتم معالجة مياه الغلاية لزيادة كفاءة التوربينات والغلايات وذلك بمنع تآكل التوربينات أو تكون القشور على الأسطح الناقلة للحرارة. وتتم معالجة المياه عن طريق التحكم في الـ PH الخاص بمياه الغلاية باستخدام مركب ثلاثي فوسفات الصوديوم Na_3PO_4 الذى يتفاعل مع الماء و ينتج القلويات التي تساعد على تقليل معدل التآكل.



وبالتالي إذا تكونت الأحماض في المياه فسوف يتم معادلتها عن طريق هيدروكسيد الصوديوم



2.2.4 اختبارات القسم الكيميائي

بعد ذلك يتم إجراء بعض الاختبارات على الماء للتأكد من درجة نقاءه وهي:

1- اختبار التوصيلية:

حيث أن الماء يعتمد في درجة توصيلته على نسبة الأملاح و المعادن الموجودة به ، ولذلك فالتوصيلية العالية تعنى وجود نسبة أملاح ومعادن عالية ، والتوصيلية المنخفضة تعنى قلة نسبة هذه الأملاح والمعادن.

2- اختبار الحامضية:

ومن خلاله يتم اختبار درجة الحامضية والقلوية للماء .

ثانياً: القسم الميكانيكي في المحطات البخارية

2.3 القسم الميكانيكي في المحطات البخارية

الهدف الرئيسي من هذا القسم هو تحويل الطاقة الحرارية الكامنة في الوقود إلى طاقة حركية . وتتحول هذه الطاقة الحركية بعد ذلك إلى طاقة كهربائية ، وسندرس ذلك في الفصل الثالث.

ملحوظة هامة جداً: الأرقام الواردة في شرح الأجزاء التالية مأخوذة من محطات حقيقية ، وهي بمثابة مثال فقط وليس بالضرورة أن تكون كل المحطات لها نفس القيم ، فأرجو ملاحظة ذلك.

والمكونات الأساسية للقسم الميكانيكي تشمل :

- الغلاية وملحقاتها
 - التربينات البخارية بملحقاتها
 - المكثف
 - مساعدات المحطة Auxiliaries
- وسنبدأ بعرض العناصر الأساسية يليها الملحقات المتصلة بها.

2.4 الغلاية (Boiler)

الغلاية عبارة عن مبنى معزول حرارياً يتكون من عدة (ثلاث) طوابق كما في الشكل 2-3 وهو أكبر مبنى بالمحطة ، ويتميز بوجود مداخن عالية لخروج عوادم الاحتراق . وتعمل الغلاية على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

و يختلف شكل الغلاية باختلاف الوقود المستخدم ، و يكون البخار الناتج عند درجة 540 درجة مئوية تقريباً و يكون ضغطه في حدود 160 بار . تعمل على توليد البخار المحمص ذو الضغط العالي ، عن طريق حرق الوقود .

وكل وحدة توليد لها غلاية خاصة بها ، وكل غلاية لها مدخنة ، وبالتالي يمكنك معرفة عدد وحدات التوليد بأى محطة من عدد المداخن العالية بها (شكل 2-9 كما سيأتى لاحقاً).

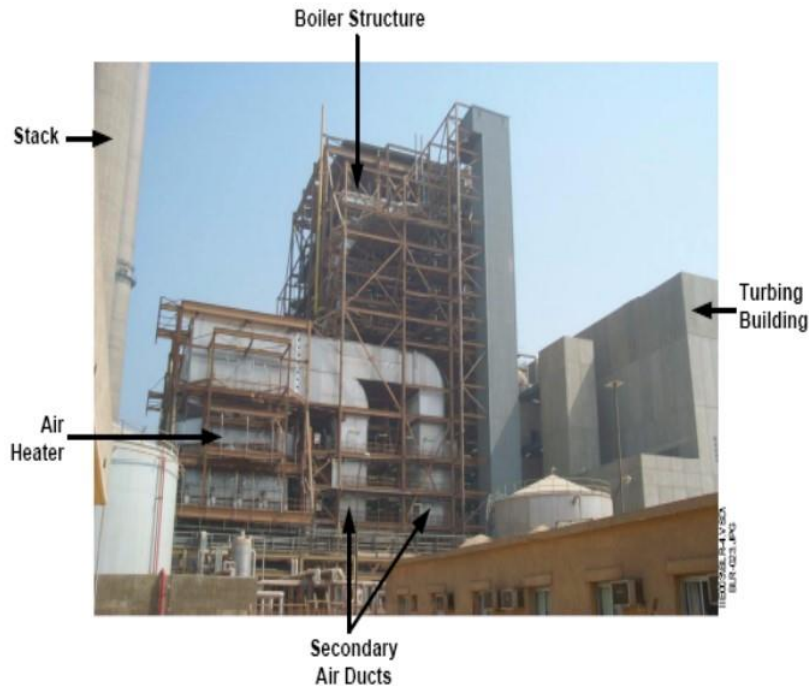


Figure 2-3 مبنى الغلاية

وتتكون الغلاية أساساً من عدد من المهمات نوجزها فيما يلي:

2.4.1 الفرن (Furnace)

كل غلاية تحتوي على فرن متعدد الوقود يتم تشغيله إما بالمازوت أو بالغاز الطبيعي.

- درجة حرارة الفرن تصل إلى 1500 درجة مئوية.
- الفرن يحتوي على عدد من الحارقات يصل في بعض المحطات إلى 18 حارق مثبتين في جدار الفرن ومقسمين إلى ثلاث مجموعات كل مجموعة في طابق.
- كل حارق يحتوي على أداة إشعال تستخدم لبدء تشغيل الفرن وتستخدم أداة الإشعال السولار كوقود لبدء التشغيل.

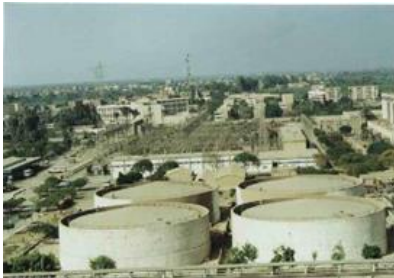


Figure 2-4 مخازن الوقود

- كل وحدة تحتوي على مروحتين Draft Fans وهما المسؤولتان عن إمداد عملية الاحتراق بما تحتاجه من هواء مضغوط.
- لابد للمحطة من الاحتفاظ بكمية كبيرة من الوقود مخزنة في خزانات كما في الشكل 2-4. وتكون مواصفات خط تغذية المحطة بالغاز الطبيعي في حدود قطر 30 بوصة وضغط الغاز 20 بار . وفي الغالب سيكون هناك خط أو خطين آخرين لتوصيل النوع الثاني من الوقود (مازوت مثلاً) .

2.4.2 الدرم (Drum)

وهو عبارة عن وعاء أسطواني ضخم كما في الشكل 2-5 يتم من خلاله فصل قطرات الماء عن البخار عن



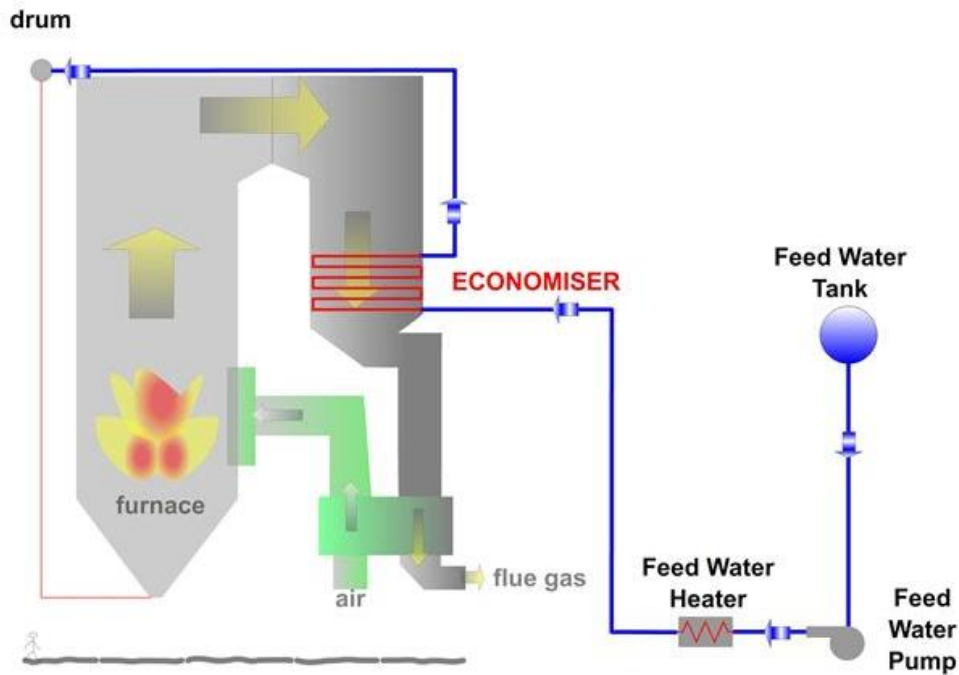
طريق إمراره على ألواح مائلة ، ويحتوى الدرم على ست فتحات سفلية من خلالها يتم سحب المياه إلى أنابيب على جدار الفرن والتي تكون مرتبة بحيث تغطي معظم الجدار الداخلي للفرن.

كما توجد أربعة صمامات للأمان تفتح في حالة زيادة الضغط داخل الدرم كما توجد في الدرم فتحة دخول للصيانة (man-hole).

Figure 2-5 Drum

2.4.3 الموقر (Economizer)

الغازات والعامد التي تنتج من الاحتراق داخل الغلاية تكون درجة حرارتها عالية فيقوم الموقر باستخدام هذه الغازات في تسخين المياه تسخيناً مبدئياً قبل دخولها إلى الغلاية حتى تقلل من كمية الوقود المستهلكة داخل الغلاية. ويظهر الـ Drum and Economizer في الشكل 2-6 ضمن منظومة مصغرة للدورة الحرارية.

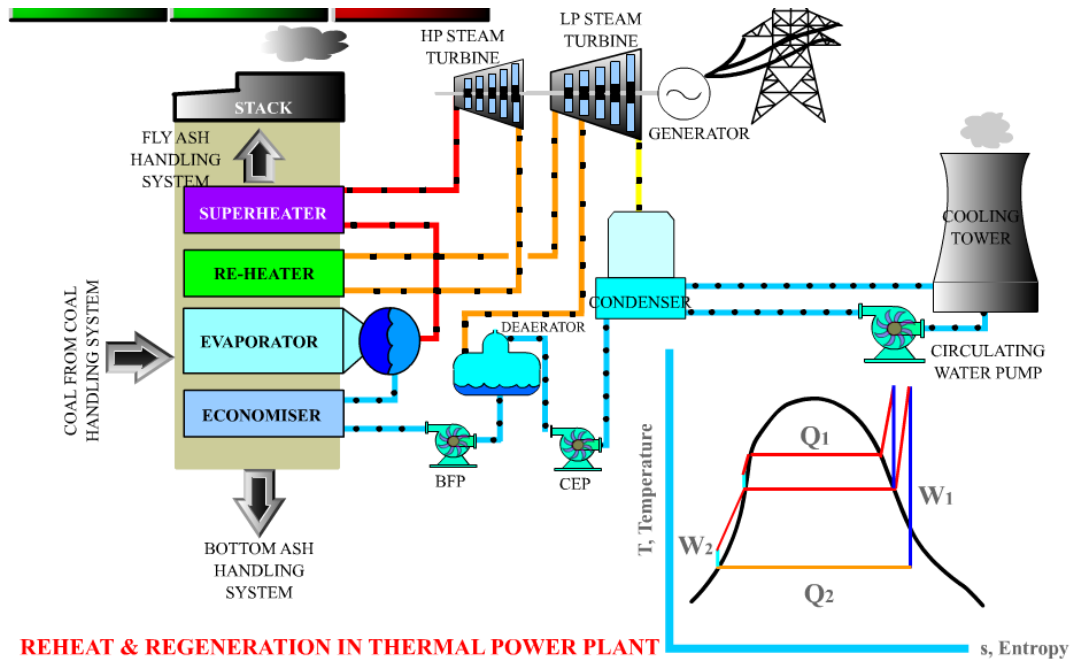


مخطط للغلاية والعناصر المرتبطة بها Figure 2-6

2.4.4 المسخنات (Heaters)

يوجد لدينا نوعان من الـ Heaters ، يمكن من الدورة البخارية الكاملة المرسومة في الشكل 2-7 تمييزهما:

- 1- (Low Pressure Heaters) ، وهي ضمن مجموعة المسخنات المبدئية للماء قبل دخولها إلى الغلاية وتستخدم في عملية تسخين الماء عن طريق استغلال حرارة البخار المستنزف (exhausted steam) وهو البخار الذي خرج من ترينة الضغط المنخفض ولا يزال يحتفظ ببعض الحرارة ، فنستفيد من هذه الحرارة في تسخين الماء قبل مروره على الـ (deaerator) كما في الشكل 2-7.
- 2- (High Pressure Re-Heaters) ، وهذه يتم من خلالها تسخين الماء عن طريق البخار المستنزف من ترينة الضغط المنخفض وترينة الضغط العالي.



الدورة البخارية بالتفصيل Figure 2-7

2.4.5 وظيفة الـ Deaerator



Figure 2-8 Deaerator

الدور الأساسي للـ Deaerator (شكل 2-8 ، هو نزع الأكسجين و ثاني أكسيد الكربون وغيرهما من الغازات الأخرى التي قد تكون مذابة في الماء الداخل على الغلاية والذي يمكن أن يسبب حدوث عمليات الصدأ في المكونات المعدنية. حيث يخفض نسبة الأكسجين إلى حوالي 7ppm .

2.4.6 المدخنة Chimney

تكون المدخنة اسطوانية الشكل مصنوعة من الطوب الحراري ومرتفعة جداً كي تعمل على طرد الدخان و الأبخرة السامة إلى الهواء على ارتفاع عالي بعيداً عن العمال و البيئة المحيطة بالمحطة . ونظراً لخروج العادم من الغلاية عند درجة حرارة عالية تصل إلى 390 درجة مئوية مما قد يؤدي إلى زيادة التلوث الجوي بالإضافة إلى كونه عادماً يحتوي على كميات هائلة من غاز أول أكسيد الكربون ، فإننا نلجأ إلى إمرار العادم على Air Pre-heater حيث يستفاد من درجة الحرارة العالية في تسخين الهواء قبل دخوله للغلاية كما ذكرنا حين الحديث عن الموفر Economizer ، وبعد ذلك نمرر العادم النهائي على مرشحات Filters لاستخلاص الغازات الضارة منه قبل الخروج من المدخنة ذات الارتفاع الشاهق. ودرجة حرارة العادم في النهاية تخرج عند درجة لا تتعدى 100 درجة مئوية ، وإلا فإن الوحدة يمكن أن تخرج من الخدمة بسبب ارتفاع حرارة العادم. والشكل 2-9 لمدخن محطة شبرا الخيمة ، التي يراها كل من يمر بطريق اسكندرية الزراعي. (أربع وحدات قدرة كل منها 315 ميجا وات)



Figure 2-9 مداخن محطة شبرا الخيمة بمصر

2.4.7 الآلات والمعدات المساعدة في المحطة

وهذه عبارة عن عدد كبير من المضخات Pumps ، والضواغط Compressors و أجهزة القياس الميكانيكية مثل أجهزة قياس الضغط ، و درجة الحرارة في كل مرحلة و بعض الأجهزة الكهربائية مثل أجهزة قياس فرق الجهد ، وأجهزة قياس التيار ، وقياس القدرة ، وغيرها.

وهناك عدة أنواع من مضخات المياه بالمحطات فمنها مضخات سحب الماء من البحر/النهر ، ومنها المضخات التي تقوم برفع ضغط الماء إلى قيمة عالية ليتم تسخينه تحت الضغط المرتفع ويتحول إلى بخار محمّص وهي ظلمبات التغذية Feeding Pumps التي تعمل على ضغط 180-225 بار ، وهذا الضغط يدخل به الماء للغلاية. وغالبا تكون 3 ظلمبات اثنان منهم مضخات تعمل بالديزل والثالثة تعمل بالكهرباء كاحتياطي.

2.5 التربيننة (Turbine)

هي الجزء المسئول عن دوران عمود المولد عن طريق تمدد البخار المحمّص الذي يدخل لتدوير التربيننة على ضغط عالي وحرارة عالية. وتتكون من عدد من الريش كما في الشكل 2-10 تتحرك بشكل دائري حول محورها و موصلة ميكانيكيا بالمولد حيث يدور المولد بنفس سرعة التربيننة ، لذلك يجب أن تدور التربيننة بسرعة ثابتة حتى يظل التردد ثابت على المولد . ويتم التحكم في ذلك عن طريق الـ Governor الذي سبق الحديث عنه .

وهذه نموذج لمواصفات إحدى التربينات بقدرة 150 ميغاوات:

RATED OUTPUT==>	150000 KW
STEAM PRESSURE->	88 BAR
STEAM TEMPERATURE=>	799
RATED SPEED=====>	3000 rpm
MANUFACTURED IN 1975 TOKYO JAPAN	

والتربيننة مقسمة إلى ثلاثة أقسام:

- تربينة الضغط العالي .
- تربينة الضغط المتوسط.
- تربينة الضغط المنخفض.

وكل قسم في التربيننة يكون عبارة عن عدة دوائر عليها زعانف كما في الصورة ، و يدخل البخار المرحلة الأولى بضغط 160 بار ، ودرجة حرارة 540 مئوية ، ويخرج البخار بعد المرحلة الأولى إلى الغلاية مرة أخرى

ليكتسب مزيداً من الطاقة ، ثم يعود ليدخل المرحلة الثانية على ضغط 40 بار ونفس درجة الحرارة. ويدخل على التربيننة ما يقرب من 800 طن بخار بالساعة.

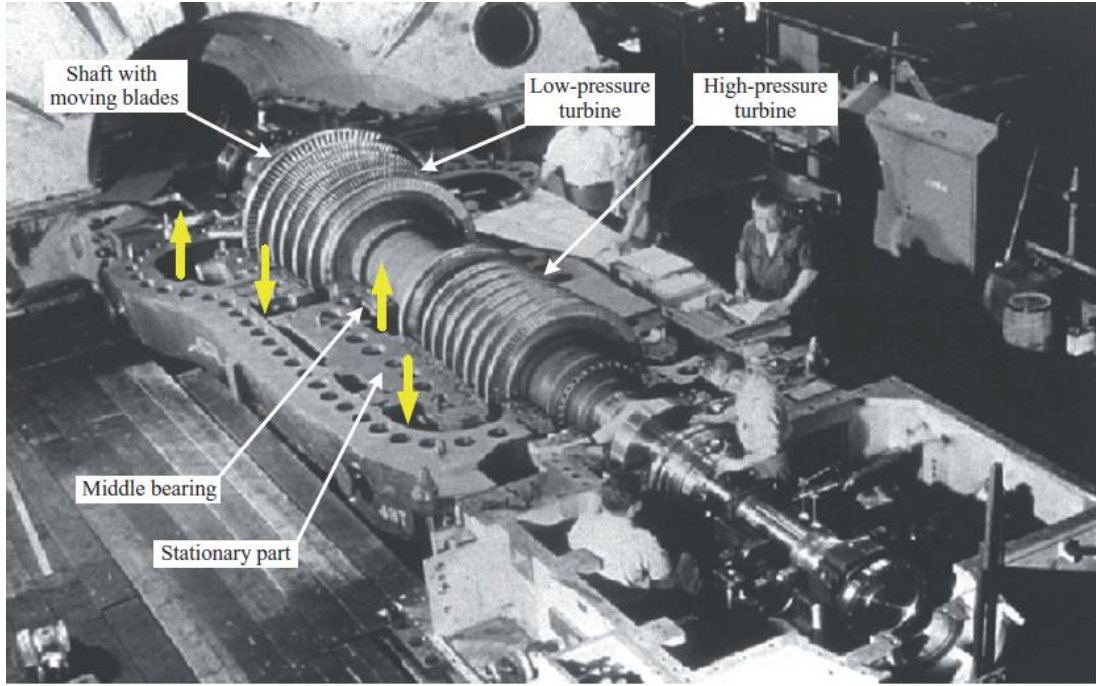


Figure 2-10 التربيننة البخارية

2.5.1 نظام التزييت في التربيننة

يوجد خلوص (فراغ) بين التربيننة وجسمها ، ويتم ملاً ذلك الفراغ بالزيت لمنع الاحتكاك وتجنب الحرارة العالية ، والمساعدة على تبريد هذه الأجزاء وكذلك تساعد على سهولة حركة عمود التربيننة . ويوجد نظام خاص بالتزييت يتكون من خزان زيت يحتوى بداخله على الزيت ، ومضخات رئيسية مركبة على عمود التربيننة وتعمل على سحب الزيت من الخزان ودفعه إلى أماكن معينة بالتربيننة ، كما يوجد أيضاً مضخات مساعدة تستخدم في بداية التشغيل ويوجد أيضاً مضخة الطوارئ التي تعمل عند انقطاع التيار الكهربائي عن الوحدة حيث تقوم بسحب الزيت من الخزان وتدفعه إلى مجمع الزيت بعد مروره بمبردات الزيت.

وهذا النظام يعتبر من الأنظمة الحرجة في المحطة ، وحدثت أى مشكلة فيه تؤدي إلى توقف الوحدة تماماً.

2.5.2 عملية تدوير التربيننة

يجب بقاء عمود إدارة التربيننة مستقيماً خلال فترات توقف الوحدة عن العمل ، والسبب في ذلك أنه عند إيقاف عمود دوران التربيننة نجد أن النصف السفلي من العمود يبرد بمعدل أسرع من النصف العلوي وهذا يؤدي إلى

حدوث إلتواء أو إنحناء في عمود دوران التربينه ، ولذلك يتم دوران عمود التربينه ببطء حتى تتساوى درجة الحرارة على جميع نقاط العمود من أعلى ومن أسفل.

2.6 المكثف (Condenser)

وهو المسئول عن تكثيف البخار الخارج من التربينه قبل أن يضخ مجددا للغلاية حيث أنها تقوم بخفض ضغطه ودرجة حرارته عن طريق مياه تبريد تسحب من النهر/ الخليج.

وفكرة عمل المكثف (شكل 2-11) هو أنه يأخذ المياه الباردة من المحيط أو البحر أو النهر ويمر البخار المراد تكثيفه فى مواسير تمر عليها هذه الكمية من المياه الباردة - فى مواسير أخرى - وعن طريق التبادل الحرارى يكتسب الماء البارد الحرارة الموجودة فى البخار حتى يتكثف. مع ملاحظة أن دورة التبريد دورة مفتوحة أى أن

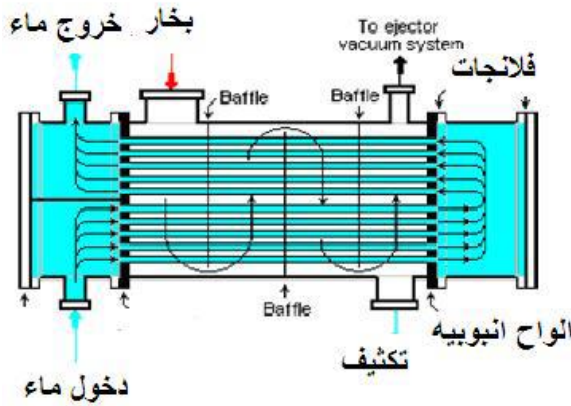


Figure 2-11 المكثف

الماء يتغير بشكل مستمر حتى يطرد الحرارة التى اكتسبها فى النهر أو البحر ثم ينتقل البخار المكثف إلى المضخة الذي يعيد ضخه للغلاية .

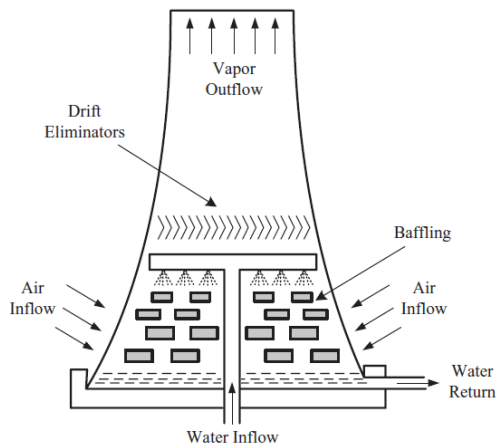


Figure 2-12 مخطط برج التبريد

وفى حالة عدم وجود مصدر مائى للتبريد (نهر مثلا) يمكن استخدام أبراج التبريد كما فى الشكل 2-12 ، حيث يدخل الماء من أعلى على شكل رذاذ Shower ويدخل تيار هواء من أسفل للتبريد فيتكثف الماء البارد لأسفل.

وبالطبع سنفقد بعضاً منه على صورة بخار وهذا هو السبب في رؤية الدخان الأبيض من هذه الأبراج كما في الشكل 2-13.



تصاعد بخار الماء من أبراج التبريد Figure 2-13

وهذه صورة لإحدى المحطات في أوهايو بأمريكا (وحدتين فقط بقدرة 2600 ميجاوات) وتظهر فيها بعض العناصر التي ذكرناها في الجزء السابق.



2.7 الدورة البخارية تفصيليا

بعد عرض المكونات التفصيلية للقسم الميكانيكي بالمحطة ، يمكن الآن دراسة الدورة البخارية بصورة أكثر تفصيلا من خلال الشكل 2-14. وسوف نعتبر مجازاً أن بداية رحلة الماء داخل المحطة تبدأ داخل الغلاية حيث يدخل الماء بعد مروره على الـ Economizer إلى الـ (Drum) داخل الغلاية والذي يغذي مواسير المياه التي تغطي السطح الداخلي للغلاية ويتم تسخين الماء عن طريق الـ Burner يدخل إليه الوقود و الهواء الساخن المضغوط بحيث يحقق النسبة النظرية (Air/Fuel).

وبعد ذلك ينتقل البخار من (الدرم) ليمر خلال محمصات Super heaters لزيادة درجة حرارة وضغط البخار بمقدار كبير حينئذ يسمى هذا البخار بالبخار المحمص حيث تصل درجة حرارته إلى (542 درجة مئوية) وضغطه إلى (105 كجم/سم²)

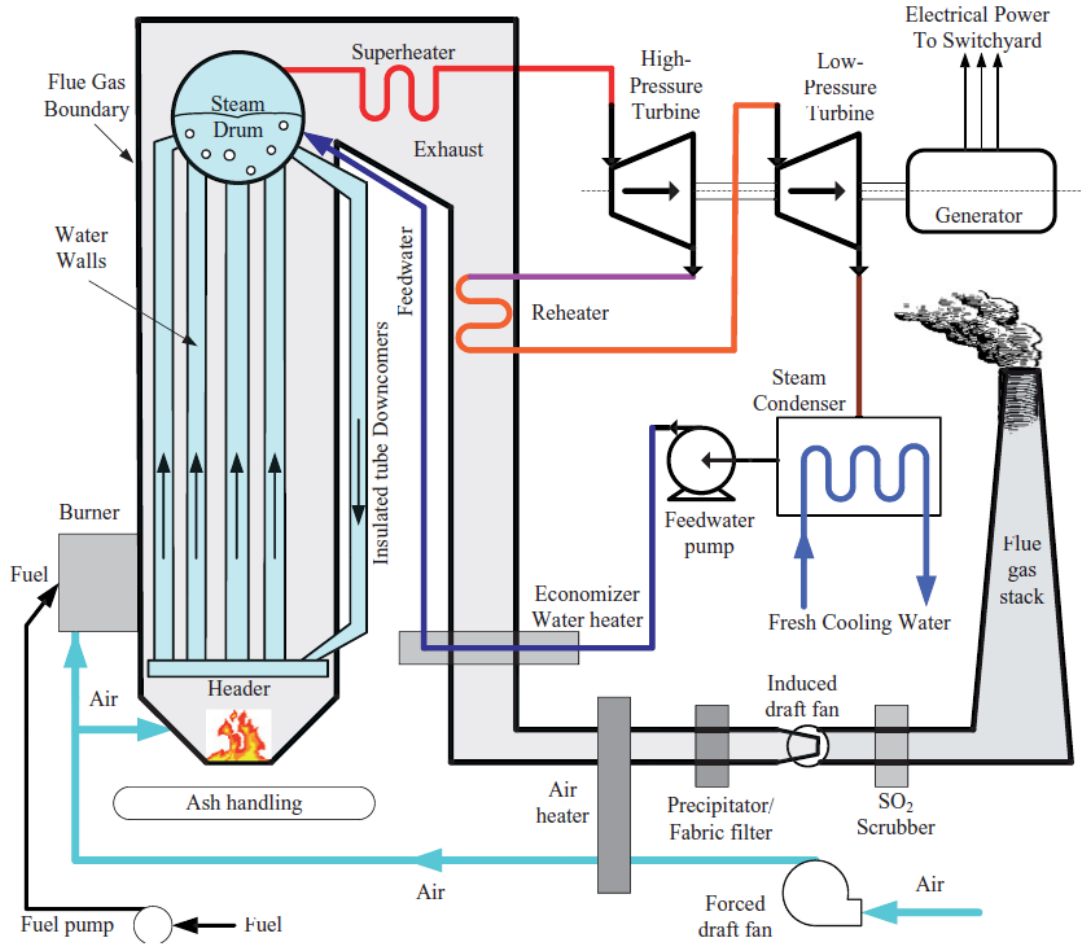
ثم يمر هذا البخار المحمص من خلال صمامات الـ Governor التي تفتح حسب الحمل المطلوب ليدخل إلى ترينة الضغط العالي ، فيتم تدوير الـ Shaft بواسطة هذا البخار المندفع ، بعد أن يتم البخار عمله داخل ترينة الضغط العالي يخرج البخار في درجة حرارة (320 درجة) ويكون الضغط أيضا قد انخفض إلى (30 كجم/سم²)

ثم يمر هذا البخار المستنزف (الذي فقد معظم طاقته) Exhausted مرة أخرى إلى الغلاية لإعادة تسخينه عن طريق ملفات تسخين Reheater ، حيث يخرج منها البخار في درجة حرارة عالية ولكن عند ضغط أقل من ترينة الضغط العالي ، ويدخل هذا البخار إلى ترينة الضغط المتوسط ويعمل على إدارتها. لاحظ أن ريش ترينة المرحلة الثانية أكبر من ريش المرحلة الأولى بسبب نقص الضغط.

و في بعض المحطات يدخل البخار من المرحلة الأولى من الترينة مباشرة إلى المرحلة الثانية مع التعزيز بكمية أخرى من البخار ، ثم يخرج البخار مباشرة إلى مرحلة الضغط المنخفض حيث تكون الترينة قد وصلت إلى أقصى عزم مرجو منها ويكون الناتج عن مرور البخار بمراحل الترينة الثلاثة هو وصول سرعة الترينة إلى 3000 لفة في الدقيقة وهي سرعة الدوران المطلوبة للحصول على التردد المطلوب (50 هرتز) وذلك تبعاً للقانون:

$$f = \frac{p \times n}{120}$$

وعند هذه السرعة يتم ربط الترينة بالمولد فيؤدي إلى دوران الـ Rotor ومن ثم توليد الكهرباء .



مخطط تفصيلي آخر للدورة البخارية Figure 2-14

ينقل بعد ذلك البخار بعد أن يكون استنفدت تقريباً كل طاقته إلى المكثف حيث يتم تكثيف البخار عن طريق خفض ضغطه وتبريده بماء بارد يسحب من النهر ويمر خلال ملفات. ويخرج الماء إلى مضخات ترفع ضغطه استعداداً لمروره على مسخنات الضغط المنخفض ومنها إلى Deviator الذي يعمل على تعويض الفاقد من الماء في هذه الدورة ويخرج الماء عند درجة حرارة 270 درجة ويدخل إلى طلمبة تغذية الغلاية لرفع ضغط الماء إلى الضغط المطلوب داخل الغلاية ثم يمر بعد ذلك إلى الموفر (Economizer) الذي يساهم أيضاً في رفع درجة حرارة الماء والبخار. ثم يعود الماء إلى داخل الدرم ليقوم بدورة جديدة.

2.7.1 تغيير الحمل على الوحدة

يتم اكتشاف أية زيادة أو نقص في الحمل بسرعة ، بواسطة (Management System) الذي يقوم بإرسال إشارة إلى كل من (Feed Water Control Valve) لدخول كمية مياه أكثر إلى الغلاية ، كما يتم إرسال نفس الإشارة إلى (Forced Draft Fan) وهي مراوح كبس الهواء لزيادة كمية أكثر من الهواء لاحتراق الوقود ، ومن ثم فإن (Governor Valve) يسمح بمرور كمية أكبر من البخار إلى التربينه ، ومن ثم يزداد

Mechanical Torque حتى يتساوى مع Electric torque فى قيمته الجديدة ويعود المولد إلى الاتزان مرة أخرى.

2.7.2 فصل الوحدة

إذا تم فصل التربينه بسبب حدوث خطأ ما يستدعى الفصل (مثل زيادة سرعة الدوران أو نقصها بدرجة كبيرة) فإن الغلاية بعد الفصل ستكون لاتزال تولد كمية بخار بدرجة حرارة وضغط عاليين ولا يوجد تصريف ، وهذا قد يؤدي إلى انفجار الغلاية. وللتغلب على ذلك يتم عمل مسار فرعي يسمى By-pass لإكمال الدورة دون المرور على التربينه ويكون هذا المسار به صمامات مغلقة لا تفتح إلا عند فصل التربينه.

الجزء الثاني من الفصل الثاني

محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي

Internal Combustion Engines

محطات التوليد ذات الاحتراق الداخلي هي عبارة عن آلات تستخدم الوقود السائل (Fuel Oil) حيث يحرق داخل غرف احتراق بعد مزجه بالهواء بنسب معينة ، فتتولد نواتج الاحتراق وهي عبارة عن غازات على ضغط مرتفع تستطيع تحريك المكبس كما في حالة ماكينات الديزل ، أو تستطيع تدوير التوربينات في حركة دورانية كما في حالة التوربينات الغازية .

وهي نوعان :

- النوع الأول: محطات التوليد الغازية (البسيطة والمركبة)
- النوع الثاني : مولدات الديزل.

النوع الأول من محطات الاحتراق الداخلي:

محطات التوليد الغازية البسيطة

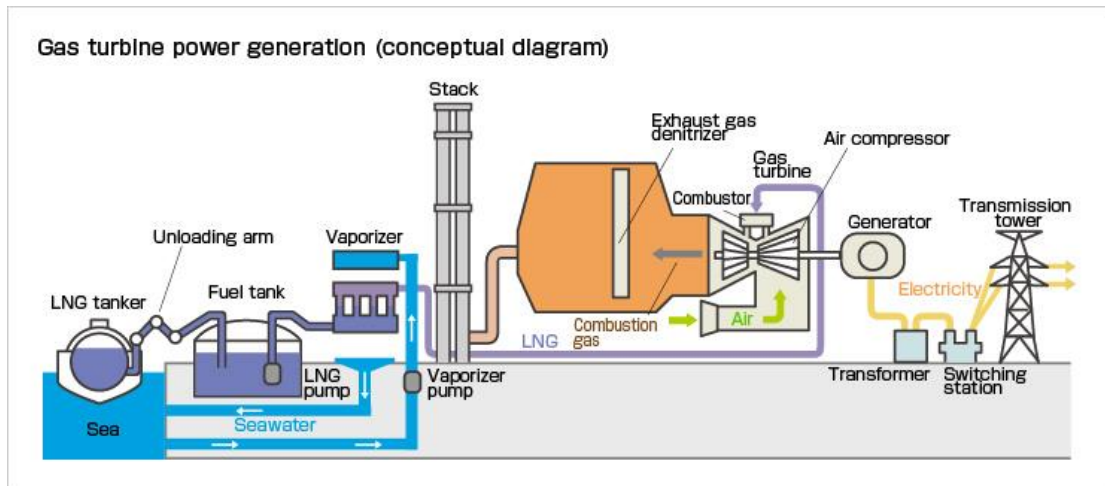
تعتبر محطات توليد الكهرباء الغازية حديثة العهد نسبياً ، ويعتبر الشرق الأوسط من أكثر البلدان استعمالاً لها ، وهي ذات سعات مختلفة من 1 ميغاوات إلى 250 ميغاوات (وحدات سيمنس الجديدة تصل إلى 400 ميغاوات) ، وتستعمل عادة عند زيادة الحمل .

و يعمل التوربين الغازي على أنواع كثيرة من الوقود ، فهو يعمل على الغاز الطبيعي وعلى الديزل والجازولين وحتى على النفط الخام ، ومن مزاياه سرعة التشغيل (عدة دقائق) بعكس التوربين البخاري الذي يحتاج إلى تجهيز وإعداد لعدة ساعات. ومن مزاياها أيضاً أنها لا تحتاج لعمالة كثيرة ، وتشغل حيزاً أصغر من المحطات البخارية.

ولكن يعيب هذه المحطات احتياجها لكميات كبيرة من الوقود وانخفاض كفاءتها ما لم تكن جزءاً من محطة دورة مركبة. إضافة إلى أن عمرها الافتراضي (15 : 25) سنة يعتبر صغيراً نسبياً مقارنة بالبخارية.

2.8 مكونات محطات التوليد الغازية :

الأجزاء الرئيسية التي تتكون منها محطة التوليد الغازية تظهر في الشكل 2-15 . وفيما يلي سنشرح أجزائها بصورة تفصيلية:



محطة توليد غازية 15- Figure2

2.8.1 الكباس الرئيسي للوحدة

يعتبر كباس الهواء الرئيسي - Air Compressor هو المحطة الأولى لدخول الهواء اللازم لإتمام عملية الاحتراق ، حيث يدخل إليه الهواء بضغط 1 بار ويقوم هو بضغط الهواء في مراحل متعددة تصل إلى 16 مرحلة في بعض الأنواع حتى يصل الضغط إلى 10.5 بار تقريباً في المرحلة الأخيرة ، ثم يدخل الهواء إلى غرف الاحتراق ليختلط مع الوقود وتتم عملية الاحتراق (شكل 2-16).

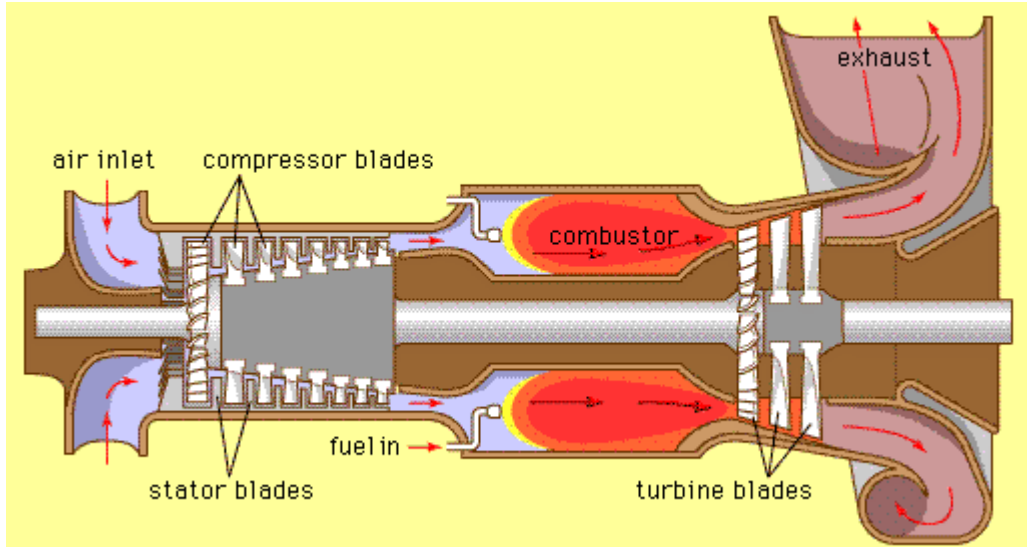


Figure 2-16 الأجزاء الرئيسية بالترتيب الغازية البسيطة

ملحوظة:

يدخل الهواء أولاً إلى الوحدة عن طريق الكباس الرئيسي من خلال مجموعة من **الفلاتر** التي تعمل على تنقية الهواء الداخل إلى الكباس لأن دخول الأتربة على ريش الكباس ستسبب في تدمير الريش ، ويوجد أيضاً نظام للتنظيف الذاتي يقوم بتنظيف فلاتر الهواء من الأتربة المتراكمة فيها .

2.8.2 غرفة الاحتراق

وفيها يختلط الهواء المضغوط الآتي من مكبس الهواء مع الوقود ويحترقان معاً بواسطة وسائل خاصة بالاشتعال. وتكون نواتج الاحتراق من الغازات المختلفة على درجات حرارة عالية جداً و ضغط مرتفع. يدخل الهواء إلى غرف الاحتراق الداخلي الموضوعة بشكل حلقي Annular بحيث يقوم الهواء بعمل وظيفتين :

- الاختلاط مع الوقود لإتمام عملية الاحتراق
- تبريد الجدران المحيطة بالغرفة

و الغرفة لها جدار داخلي يتكون من بلاطات مقاومة حرارياً ثم مدخل الهواء الخارج من الكباس ثم نظام الوقود ويوجد على الغرفة نظام بادئ الإشعال Ignition system كما يوجد نظامين للحريق وهما Diffusion و الـ Premix

يقوم محول بادئ الإشعال بإعطاء إشارة الإشعال على المواقد Burners في نفس الوقت التي تقوم فيه المواسير الخاصة بالإشعال بإخراج الغاز إلى أن يتكون الحريق الأساسي "Main Flame" وفي بداية تشغيل الوحدة يكون نظام الحريق Diffusion وهو عبارة عن لهب طويل ومركز يمر من أعلى نقطة في غرفة الحريق بعد الموقد إلى قرب نهاية الغرفة ليضمن وجود حريق في جميع أنحاء الغرفة. وبعد أن تدخل الوحدة على الشبكة عند تردد 50 هرتز 3000 RPM وترتفع الميجاووات للوحدة تزداد درجة الحرارة إلى أن تصل إلى 470 درجة وعندها يتم التحويل من نظام الحريق Diffusion إلى نظام الحريق premix

نظام الحريق : Premix هو لهب قصير وموزع بانتظام على الغرفة و يقوم بعملية الاحتراق دون أن يؤثر على الغرفة كنظام الـ Diffusion وهو يدخل من بعد درجة حرارة 470 درجة إلى أن تصل الحرارة إلى 500 درجة وهي أقصى درجة حرارة تتحملها الوحدة.

بعد أن تتم عملية الاحتراق داخل غرفة الاحتراق الداخلي نتيجة خلط الهواء المضغوط بضغط عالي مع الوقود سواء كان هذا الوقود وقوداً غازياً أو وقوداً سائلاً تكون نواتج الاحتراق غازات بدرجة حرارة تصل إلى 1050 درجة مئوية ومضغوطة بضغط عالي قد يصل إلى 10.5 بار عندها تدخل هذه الغازات إلى التربينه حيث يحدث تمدد لها داخل التربينه وتبدأ التربينه في الدوران.

2.8.3 التربينه الغازية

و هي عبارة عن تربينه محورها أفقي (شكل 2-17) مربوط من ناحية مع محور مكبس الهواء مباشرة و من ناحية أخرى مع المولد الكهربائي فتدخل الغازات الناتجة عن الاحتراق في التوربين فتصطدم بريشها الكثيرة العدد من ناحية الضغط المنخفض وتخرج إلى الهواء عن طريق المدخنة .



Figure 2-17 تربينة غازية

2.8.4 المولد الكهربى

يتصل المولد الكهربى مع التوربين بواسطة صندوق تروس لتخفيف السرعة لأن سرعة التوربين عالية جداً بالنسبة لـ سرعة المولد . والمولد الكهربى يستخدم لتحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة عن دوران الـ shaft بين التوربين و المولد الكهربى إلى الطاقة الكهربائية. وسنعرض بمزيد من التفصيل للمولد فى الفصل الخاص بالقسم الكهربى فى المحطات.

2.8.5 الآلات والمعدات المساعدة للتربينة الغازية

تحتاج محطات التوليد الغازية إلى بعض المعدات و الآلات المساعدة مثل:

- 1- مساعد التشغيل الأولى ، وهو إما محرك ديزل أو محرك كهربى
- 2- وسائل مساعدة على الاحتراق
- 3- آلات تبريد مياه لتبريد المحطة
- 4- معدات قياس الحرارة والضغط فى كل مرحلة من مراحل المحطة
- 5- معدات القياس الكهربائية المختلفة مثل: الأميتر - الفولتميتر - الواتميتر

2.8.6 طريقة البدء فى المحطات الغازية

فى المحطات الغازية لا يتم عمل إشعال Fire للغاز الداخلى على المولد من الثبات (بمعنى لا يبدأ الاحتراق إذا كانت التربينة لم تبدأ الدوران بعد) ، ولكن يتم تشغيل المولد باستخدام Starting Motor منفصل ، ويبدأ المولد يبدأ العمل كموتور ثم بعد الوصول لـ سرعة 550 لفة فى الدقيقة تقريبا يتم عمل Fire ودخول الغاز على التربينة.

ملحوظة:

البلاد التي تعتمد على استيراد الغاز لتشغيل محطات الكهرباء بها يجب أن تتوفر لديها البنية التحتية الخاصة بإعادة تحويل الغاز المسال إلى حالته الغازية *Regasification* ، وهذه البنية الأساسية تشمل إنشاء ميناء ومحطات تخزين (هناك أنواع من السفن تعمل كمصنع متحرك لإسالة الغاز المستورد وتستأجرها بعض الدول لحل أزمة الغاز في محطات الكهرباء لديها).

2.8.1 صمامات طرد الهواء BLOW OFF VALVES

لإيقاف الحمل على ضاغط الهواء Compressor في التربينات الغازية أو لإيقاف التربينات يتم فتح صمامات تسمى صمامات طرد (نذف) الهواء والتي بدورها تقوم بطرد الهواء إلى خارج الضاغط ليكون حمل الضاغط أقل من 30% . والهدف من ذلك تقادى حدوث surge في الضاغط بسبب اختلاف عزم الضاغط وعزم التربينات ، ويتم تمرير الهواء المطرود إلى مجرى العادم. مع ملاحظة أنه إذا حدث زيادة في فرق الضغط ما بين فلاتر الكباس و مدخل الكباس فسيؤدي ذلك إلى وجود ضغط عكسي Back pressure يمكن أن يعمل على تدمير ريش الكباس الرئيسي.

النوع الثاني من محطات الاحتراق الداخلي:

توليد الكهرباء بواسطة الديزل

Diesel Power Station

تستعمل ماكينات الديزل (شكل 2-18) في توليد الكهرباء في أماكن كثيرة وخاصة في المدن الصغيرة والقرى . وهي تمتاز بسرعة التشغيل وسرعة الإيقاف ولا تحتاج إلى مساحة كبيرة من الأرض لقلة المساعدات فيها ، ولا تحتاج لأعمال مدنية كثيرة عند الإنشاء .



مولد ديزل Figure 2-18

ولكنها تحتاج إلى كمية مرتفعة من الوقود نسبياً وبالتالي فإن كلفة الطاقة المنتجة منها تتوقف على أسعار الوقود . ومن ناحية أخرى لا يوجد منها وحدات ذات قدرات كبيرة . أما في محطات القوى فتستخدم ماكينات الديزل ذات القدرات الكبيرة والتي تتراوح من 3 إلى 5 ميغاوات .

وهذه المولدات سهلة التركيب وتستعمل كثيراً في حالات الطوارئ أو أثناء فترة ذروة الحمل . في هذه الحالة يعمل عادة عدد كبير من هذه المولدات بالتوازي لسد احتياجات مراكز الاستهلاك . كما أن منها نوع يحمل على سيارات كما في الشكل التالي . ويمكن نقله إلى الأماكن التي تحدث بها مشكلة كبيرة في التغذية الرئيسية ، وتحتاج لتوليد مؤقت ، فيمكن بسهولة نقل هذه المولدات إليها (سعر الميجاوات من هذه الوحدات يصل إلى حوالي مئة ألف دولار) .



ومن عيوب هذه المحطات احتياجها لصيانة متكررة بسبب كثرة الأجزاء المتحركة فيها . وكعادة المحطات الحرارية لا تتجاوز كفاءتها 35% .

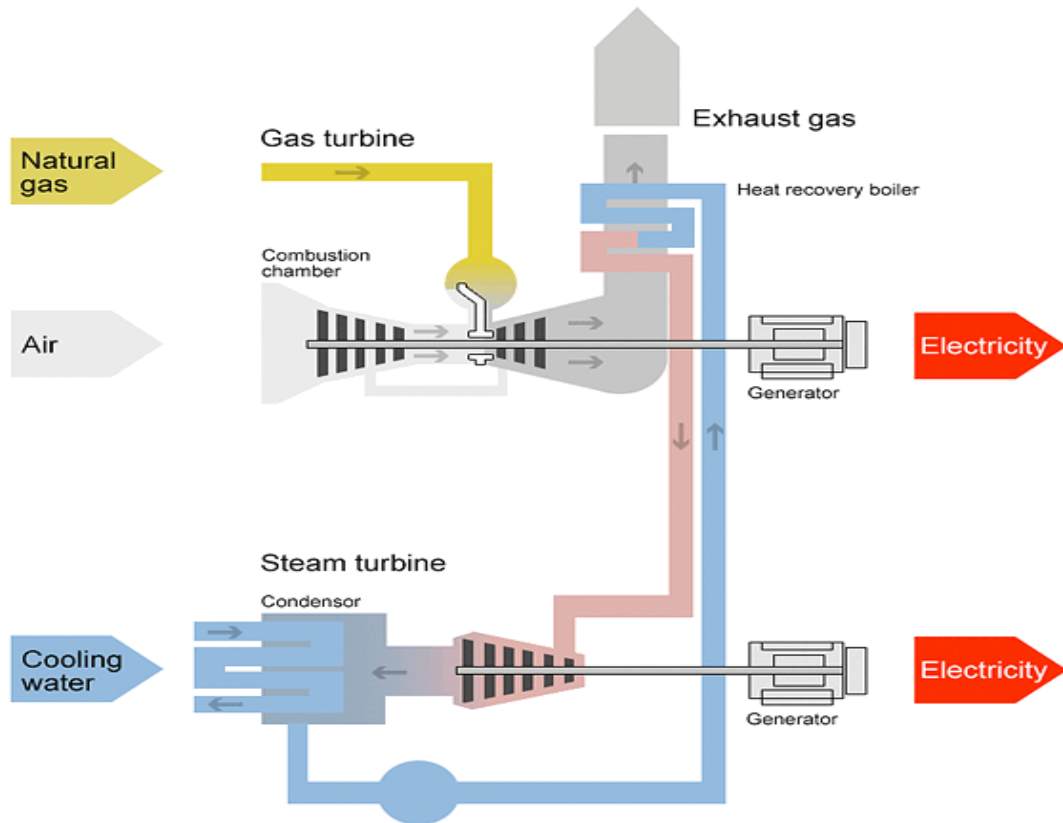
محطات الدورة المركبة

تتكون المحطات ذات الدورة المركبة Combined Cycle من وحدة غازية ووحدة بخارية ، حيث ينتج عن الوحدة الغازية نواتج احتراق تصل درجة حرارتها إلى 500 درجة مئوية ، وهذه النواتج تهدر في الجو دون استفادة منها .

و السؤال هنا كيف نستفيد من هذه الطاقة المهدرة؟

2.9 فكرة عمل الدورة المركبة Combined Cycle

تقوم فكرة عمل الوحدات المركبة (شكل 2-19) على الاستفادة من الطاقة المهدرة في الغازات الساخنة الخارجة من التربينات الغازية من خلال إنتاج كمية البخار اللازمة لتشغيل تربينة البخارية تضاف إلى الوحدة ، وتتم هذه العملية من خلال وحدات استعادة الطاقة HRSG ، Heat Recovery Steam Generator ، وهذه الوحدات تقوم مقام الغلاية والفرن في الوحدات التقليدية ، مما يحقق توليد طاقة إضافية وتوفر ثلث كمية الوقود المستخدمة بالمقارنة بالوحدات البخارية. لاحظ أن الوحدة البخارية في محطات الدورة المركبة لا تستخدم أى وقود ، وإنما فقط تستخلص الطاقة من غازات الوحدة الغازية.



مخطط الدورة المركبة Figure 2-19

يبدأ العمل من الوحدة الغازية بأخذ الهواء الجوى بعد مروره على الفلاتر لتنقيته ، ثم يدخل على الضاغط الذى يقوم بضغط الهواء ، ثم يمر على غرف الاحتراق وتخرج الغازات المحترقة من غرفة الاحتراق للدخول على التربينه الغازية وبعد ذلك يدور المولد وتتولد الكهرباء (من الوحدة الغازية كما فى المحطة الغازية البسيطة). أثناء ذلك تمر الغازات الساخنة الخارجة من التربينه الغازية إلى وحدة الـ HRSG لتحويل المياه إلى بخار كما سبق شرحه فى المحطات البخارية.

2.9.1 وحدة الـ HRSG:

وحدات استعادة الطاقة HRSG ، Heat Recovery Steam Generator والتي تظهر فى الشكل 2-20 تقوم مقام الغلاية والفرن فى الوحدات التقليدية فى أن واحد وهو بالفعل كذلك حيث يتكون داخليا من :

Super heater and Water preheater ، Evaporator ، Economizer

ووظيفته استخلاص الحرارة من الغازات القادمة من الوحدة الغازية فى توليد البخار اللازم للوحدة البخارية.

ومن مهام الـ HRSG الأخرى أنه يتم من خلالها التحكم فى الانبعاثات الناتجة من العوادم التي تخرج للهواء عن طريق نوعين من المحفزات Catalysts متواجدين فى الـ Heat Recovery Steam Generator (HRSG) ، أولهم يتحكم فى مقدار أول اكسيد الكربون الموجود فى العوادم ، و الآخر يتحكم فى أكاسيد النيتروجين .



Figure 2-18 Heat Recovery Steam Generator

وبعض أنواع من الـ HRSG تكون مزودة بـ duct firing من أجل إعطاء مزيد من الطاقة أكثر من التي حصل عليها من خرج الوحدة الغازية من أجل الحصول على كمية أكبر من البخار.

2.9.2 كفاءة محطات الدورة المركبة:

كفاءة المحطات الغازية بمفردها لا تتعدى 30% ، لكن عند تركيب وحدة بخارية معها تزيد الكفاءة للإثنين معا إلى ما يقرب 52% . (وحدات الجيل الجديد تصل إلى 61%) . حيث يساهم هذا الأسلوب في رفع كفاءة المحطة ، علما بأن ثلث القدرة تنتج من البخار (18%) و الثلثين (31%) من الغاز أو الوقود الحفري المستخدم.

و يمكن الاستفادة أيضا من درجة حرارة هواء العادم الذي يخرج من الـ HRSG و التي تصل إلى 140 درجة في الاستخدامات الصناعية الأخرى .

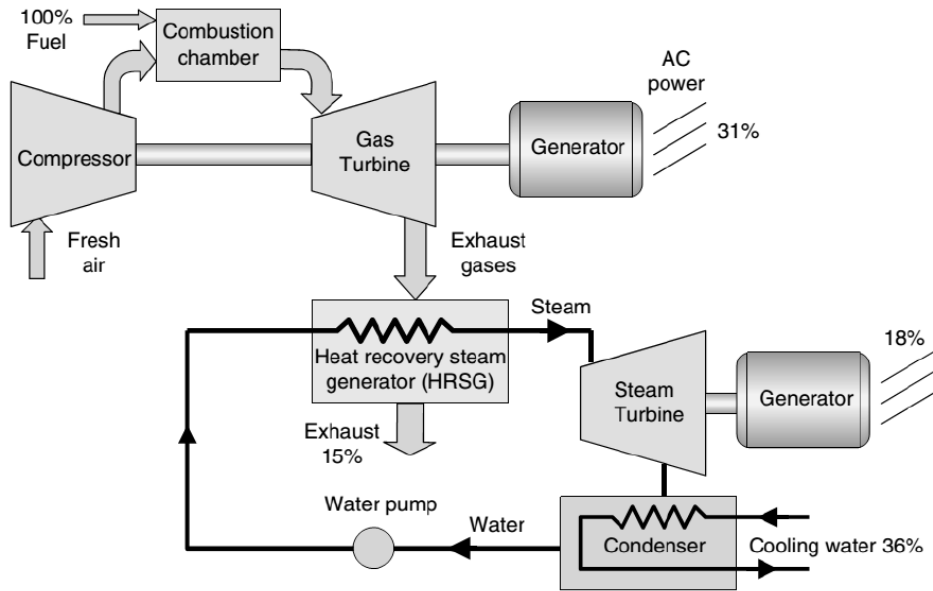


Figure 2-21 كفاءة محطات الدورة المركبة

2.9.3 مزايا محطات الدورة المركبة :

- تكلفة محطات الدورة المركبة أقل بكثير من نظيرتها من المحطات التي تعتمد فقط على البخار Steam power plants لنفس القدرة الكهربائية.
- لا تحتاج الكثير من الوقت للصيانة.
- المخلفات الصلبة تعتبر أقل بكثير من المحطات الأخرى .

- المحطة لا تحتاج إلى مصدر طاقة خارجي لبدء التشغيل في حالة خروجها عن العمل للصيانة.
- سرعة الدخول على الشبكة حين الحاجة إليها.

2.9.4 أمثلة لمحطات الدورة المركبة في مصر :

1. محطة طلخا في المنصورة - سعة : 750 ميجاوات
 - تتكون من وحدتين غازيتين كلا منها 250 ميجاوات بالإضافة إلى وحدة بخارية بسعة 250 ميجاوات.
2. محطة دمنهور - سعة 158 ميجاوات
 - عدد 4 توربينات غازية قدرة كل منها 25 ميجاوات + ترينة بخارية بقدرة 58 ميجاوات.
3. محطة الكريماط المركبة 1 و 2 :
 - كلا منها يتكون من 2 ترينة غازية بقدرة 250 لكلا منها + ترينة بخارية 250 ميجاوات.
 - وهي تعمل بوقود الغاز الطبيعي كوقود أساسي ووقود السولار كوقود بديل وترتبط هذه الوحدات المركبة بالشبكة الكهربائية الموحدة من خلال ست دوائر كهربية جهد 220 كيلو فولت و تغذي محطات محولات **دمو** و بني سويف و البساتين.

والشكل 2-22 يمثل صورة لإحدى محطات الدورة المركبة في فرنسا



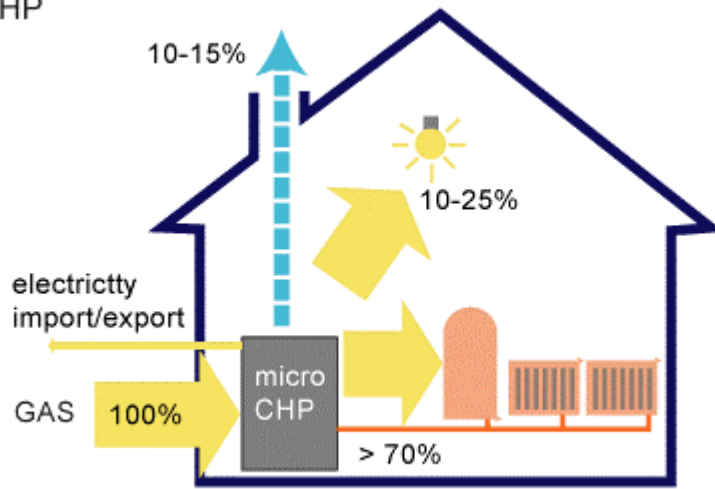
Figure 2-19

Combined Cycle PP (500 MW) 61% efficiency

توليد الكهرباء بواسطة Micro CHP

نفس الفكرة السابقة في محطات التوليد الغازية المركبة تستعمل الآن على نطاق واسع ولكن بأحجام توليد صغيرة ضمن تكنولوجيا تسمى Micro Combined Heat and Power, Micro CHP. والفكرة فيها هي استخدام مولد صغير للكهرباء يعمل بالغاز في منزل أو مؤسسة صغيرة لتوليد الكهرباء (متاح بالسوق من 1 وحتى 50 kW)، ثم يتم الاستفادة من الفوائد الحرارية له في تسخين المياه بالمنزل، وبالتالي تصبح كفاءة المنظومة أعلى من مجرد توليد الكهرباء فقط وتصل إلى 85%. والشكل التالي يشرح ببساطة فكرة هذه المنظومة.

Micro CHP



5kW



10kW



3

القسم الكهربى فى محطات التوليد

هو الجزء المسئول عن إنتاج الطاقة الكهربائية فى منظومة القوى ، بمعنى آخر هو الجزء المسئول عن تحويل الطاقة الحركية الدورانية إلى طاقة كهربية . وفيما يلى أهم العناصر والمنظومات فى القسم الكهربى بمحطات التوليد :

- 1- المولد الكهربى (Generator)
- 2- المحولات (Transformers)
- 3- منظومة المجال المغناطيسى (Excitation System)
- 4- دوائر الـ Power Circuits التى تقوم بنقل القدرة من المولدات إلى محولات الرفع
- 5- دوائر القدرة المساعدة لتغذية جميع مساعدات المحطة
- 6- خلايا الجهد المتوسط (Switch Gear 6.3 KV)
- 7- حوش المفاتيح (Switch Yard)
- 8- خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة (Power Center)
- 9- خلايا الجهد المنخفض (MCC ، Motor Control Center)
- 10- منظومة الجهد الغير منقطع (Ups ، Uninterruptable Power Supply)
- 11- دوائر الإنارة لإضاءة المحطة وإمداد القدرة لأجهزة الخدمة والصيانة
- 12- منظومة البطاريات والشواحن (Battery & Battery charger)
- 13- منظومة القياس (measurement system)
- 14- منظومة الاتصالات: (Communication System)
- 15- نظام تحكم إشرافى عن بعد SCADA System
- 16- نظام التحكم: (Control System)
- 17- منظومة الحماية: (Protection System)

وفيما يلى نتحدث بشئ من التفصيل عن بعض العناصر السابقة الممثلة للقسم الكهربى فى المحطات ، ويستكمل الحديث عن البعض الآخر فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل Substations .

3.1 مكونات المولد الكهربى

أهم عنصر فى القسم الكهربى هو بالتأكيد المولد. وهو دائما من النوع المعروف بالـ Synchronous Generator. ويتكون Synchronous Generator من جزئين أساسيين هما Rotor and Stator ، حيث توضع ملفات الـ Field فى الجزء الدوار Rotor الذى يتصل بالتربينة مباشرة ، وهى التى تعطيه الحركة فيدور ، فيقطع الفيض المتولد فيه الملفات الموجودة داخل Stator ، فيتولد بها جهد كهربى ، أو بمعنى آخر تتولد القدرة الكهربائية التى ينتجها المولد والتى تستخدم فى تغذية الأحمال. و يتم تغذية ملفات المجال (field) بتيار مستمر (dc voltage) عن طريق منظومة الإثارة Excitation System التى سنتحدث عنها لاحقا .

والشكل 1-3 يمثل أهم الأجهزة المتصلة بالمولد كما يظهر فى مخططات المحطة ، ويليه شكل أكثر تبسيطا .

وفيه تلاحظ أن المولد يغذى المحول الرئيسى للوحدة GSUT ، Generator Step Up Transformer ، كما يغذى أيضا مباشرة كلا من المحول المساعد UAT ، Unit Auxiliary Transformer و يغذى كذلك محول تغذية منظومة المجال المغناطيسى Excitation transformer.

لاحظ وجود مصادر تغذية خارجية External Source مركبة على دوائر المساعدات للمولد ، لأنه فى حالة خروج المولد من الخدمة لا يمكنه أن يسترجع التشغيل دون وجود المساعدات أولا ، وهذه المساعدات تحتاج لمصدر طاقة ، وبما أن المولد لم يرجع للخدمة بعد فلذلك احتجنا لوجود هذه المصادر الخارجية ، التى قد تكون مجرد اتصال بالشبكة العامة أو اتصال بمولد طوارئ بالمحطة.

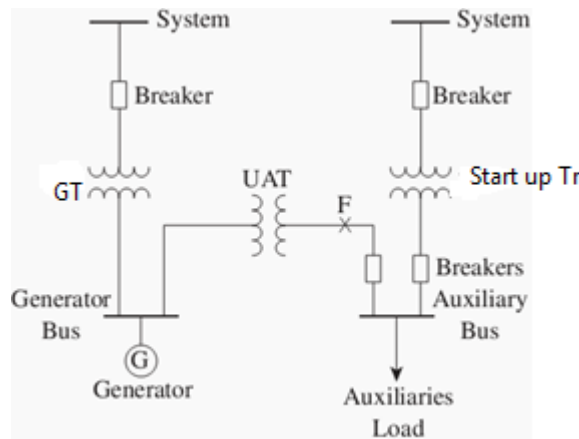


Figure 3-1 Generator SLD

وهذه بعض مواصفات للعناصر التى ظهرت فى الشكل السابق:

- Main generator: Turbo generator ، 19KV ، 0.85 pf ، 440 MVA ، 3000 rpm ، 50 Hz
- Main Step-Up Transformer: 19/500 KV ، 480 MVA ، two winding ، Shell Type ، ONAF
- Auxiliary Transformer: 19/6.6/6.6 KV ، 40 MVA ، Three winding ، Core Type ، ONAF
- Medium voltage switchgear: 6.6KV ، 2500 A ، 40KA short circuit capacity
- Isolated Phase Bus duct (IPB): that connecting Generator ، Aux Transformer and Main Transformer ، 19KV ، 16000A.

وفيما يلي بعض التفاصيل عن مكونات المولد.

3.1.1 العضو الثابت Stator والعضو الدوار Rotor

أما الـ stator فهو عبارة عن رقائق من الصلب السليكوني معزولة عن بعضها بمادة الميكا مكونة معا مجارى أو slots ملفات العضو الثابت كما فى الشكل 2-3.



Figure 3-2 Stator

وهناك ملفات العضو الثابت Stator Windings : وهى الملفات التي تنشأ بداخلها القدرة الكهربائية المتولدة وتتصل بالمحول الرئيسي مباشرة لنقل هذه القدرة للشبكة الكهربائية الموحدة عن طريق محطة المحولات.

وأما الـ Rotor فهو أيضا عبارة عن رقائق من الصلب السليكونى معزولة عن بعضها بمادة الميكا مضغوطة ومركبة على عمود Shaft مكونة معا مجارى العضو الدوار كما فى الشكل 3-3.



Figure 3-3 Rotor

وملفات المجال Field Windings : موجودة بالعضو الدوار وتتغذى من منظومة الإثارة Excitation System لتكوين المجال الكهربى اللازم لعملية توليد الكهرباء عن طريق Brushes ، وتتم عملية نقل الكهرباء إليها عن طريق فرش من الكربون تنقل التيار Field Current إلى الملفات الموجودة بالعضو الدوار .

3.1.2 منظومة التبريد

يحتاج المولد إلى منظومة تبريد بسبب الحرارة الناتجة عن المفايد الكهربائية والمغناطيسية الناتجة عن مرور التيار الكهربى . ويتم التبريد عن طريق منظومتين :

- منظومة الهيدروجين Hydrogen Plant .
- ماء منزوع الأملاح Demi Water ضمن منظومة Stator Cooling

واستخدام الهيدروجين فى التبريد له ميزات وعيوب ، فمن ميزاته القدرة التبريدية العالية وأنه عازل جيد وأيضا له قدرة عالية على التوصيل الحرارى أكثر من أى غاز آخر ، لكن العيب الخطير أنه يشتعل وينفجر إذا اتحد مع الأكسجين حين تزيد نسبته فى الحيز المغلق عن 14% (لاحظ أنه معزول تماما عن الأكسجين داخل المولد) . ومن هنا كان من أهم إجراءات السلامة عند حدوث عطل بالمولد سرعة طرد الهيدروجين من المولد وذلك بتوصيله بـ Vents عالية خارج المحطة فى الهواء الطلق وتسمى باللهجة المصرية عملية "التقنيت" ، وإلا ستنفجر الوحدة.

ودائما يكون هناك داخل محطة التوليد معمل لفصل الهيدروجين من الماء بالتحليل الكهربى ، ثم تعبئته فى اسطوانات كما فى الشكل 3-4 لاستخدامه إذا حدث تسريب للهيدروجين الأصلي.



Figure 3-4 اسطوانات غاز الهيدروجين بالمحطة

3.1.3 كيف يتم توليد المجال المغناطيسي؟

وبصفة عامة فإن الـ Generator عمليا يحتاج إلى ثلاث عناصر إضافية أخرى (سوى الـ Rotor and stator) ليعمل بصورة صحيحة وهم :

- Exciter
- Permanent Magnet
- Automatic Voltage Regulator

3.1.4 العناصر المرتبطة بمنظومة الـ Excitation

أما الـ Exciter ، فهو عبارة عن 3-phase generator صغير نسبيا مقارنة بالمولد الأصلي ، وهو ينتج جهد منخفض (حوالي 500 فولت) ، وتيار عالي جدا (حوالي 5000 أمبير) ، ويركب هذا المولد الصغير على نفس الـ Shaft الخاص بالمولد الأصلي الكبير. ووظيفته هو تغذية الـ Field الخاص بالمولد الأصلي بتيار DC ، وهو التيار الذى ينتج الفيض المغناطيسى الذى سيقطع ملفات الـ Stator لينتج فيها الكهرباء. وهنا يبرز سؤالان:

الأول: كيف نحصل على تيار DC من داخل الـ Exciter رغم أنه مولد 3-phase ؟

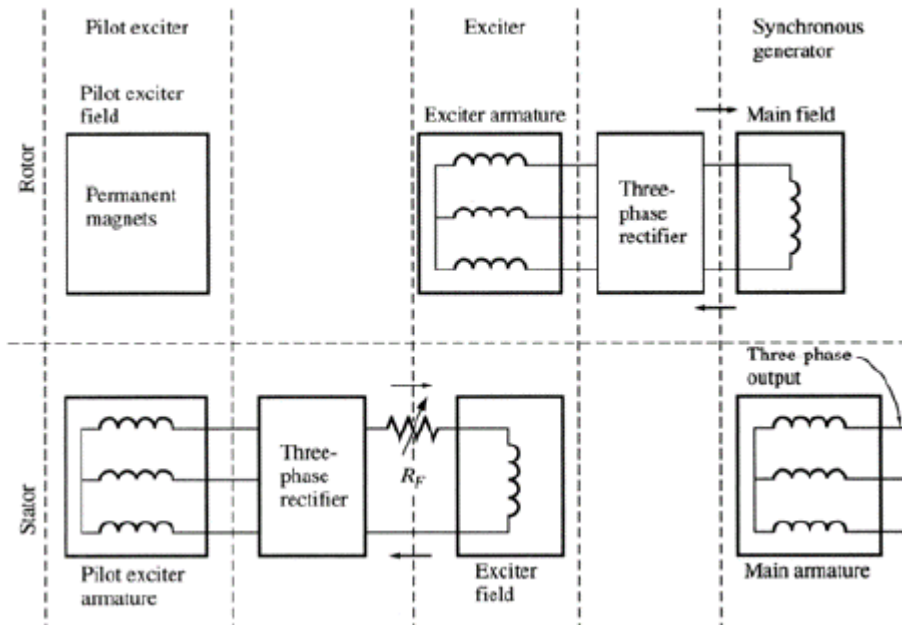
الثانى : من أين يحصل المولد الصغير " Exciter " على تيار الـ Field الخاص به ؟

بالنسبة للسؤال الأول فإن التيار الـ 3-phase المولد من مغذى المجال (الـ Exciter) يتم عمل Rectification له لتحويله من تيار متردد إلى تيار مستمر عن طريق وحدة تحويل تركيب داخل المولد. أما بالنسبة للسؤال الثانى فإن ملفات الـ Field الخاصة بالـ Exciter فى الوضع الطبيعى تحصل على تيارها من المولد الأسمى.

و لكن المولد الأسمى لم يبدأ العمل بعد انتظارا للتيار القادم من الـ Exciter ، وهو ما يشبه الفزرة القديمة : من جاء أولا البيضة أم الدجاجة؟.

ولحل هذه المشكلة تزود المولدات بـ 3-Phase Generator آخر قبل الـ Exciter ، وهو أصغر منه حجما (جهده حوالي 100 فولت) ، لكنه يتميز بأنه مزود بمغناطيس دائم قوى Permanent Magnet ويسمى هذا المولد بـ PMG ، حيث يولد هذا المغناطيس الدائم فيضا مغناطيسيا يكفى لبدء تشغيل الـ PMG الذى سينتج 3-phase current يتم توقيده بواسطة دائرة توحيد مشابهة للمستخدممة مع الـ Exciter ليقوم بتغذية ملفات الـ Field الخاصة بالـ Exciter .

وبالتالى فالقصة تبدأ كما فى الشكل 3-5 من الـ PMG الذى يغذى الـ Exciter الذى سينتج تيارا يتم توقيده ليكون هو تيار الـ Field للمولد الأسمى الكبير. مع ملاحظة أن التيار الناتج من المولد الأسمى سيخصص جزء منه لتغذية ملفات الـ Field للـ Exciter بدلا من الـ PMG الذى يتم فصله بعد مرحلة البدء . والشكل يلخص هذه المراحل جميعا.



مخطط أجزاء المولد Figure 3-5

أما الشكل الحقيقى لهذه العناصر فتظهر فى الشكل 3-6 .



صورة محطة توليد Figure 3-6

3.1.5 كيف يتم التحكم أوتوماتيكيا في قيمة الجهد؟

أثناء التشغيل الطبيعي فإننا نحتاج إلى الـ Automatic Voltage Regulator (AVR) الذي يقوم بضبط قيم الجهد عند أطراف المولد عند حدوث أى تغيرات غير طبيعية. وهو عبارة عن لوحة إلكترونية تحتوي على دوائر لتوحيد التيار وتحويله من تيار متردد AC (قادم من ملفات العضو الثابت) ، إلى تيار مستمر (DC) يتصل بنظام الـ Excitation الرئيسي للمولد حيث تستخدم بعد رفع قيمة الجهد للمولد إلى القيمة المقننة كما فى الشكل 3-7.

والـ AVR يتحكم أوتوماتيكيا فى نظام الـ Excitation بغرض تثبيت جهد المولد والتغلب على التغيرات المحدودة نسبيا فى قيمة الجهد.

إذا استشعر الـ AVR وجود تغير فى الفولت على أطراف المولد فإن حجم هذا التغير فى الجهد يترجم إلى تيار وإشارة للثريستور ويغير قيمة الـ Firing angle للثريستور داخل الـ Exciter من أجل زيادة قيمة تيار المجال ، وبذلك يزداد الفيض المغناطيسي ، ومن ثم يتم تعويض نقص جهد المولد الرئيسي كما فى الشكل 3-7.

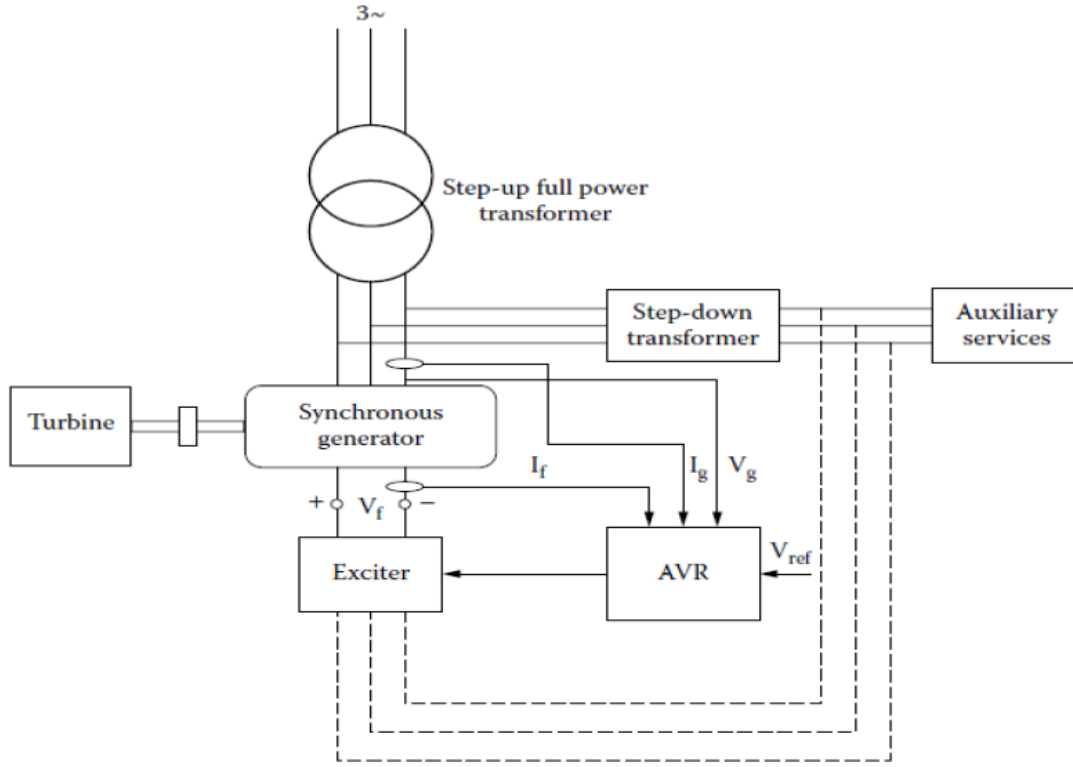


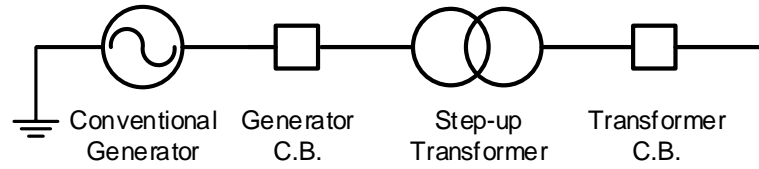
Figure 3-7 منظومة التحكم فى جهد المولد

3.1.6 الجيل الجديد من المولدات

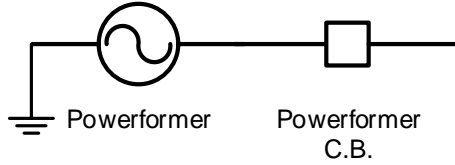
جميع المولدات الكهربائية المستخدمة فى الأنواع السابقة تصمم بحيث يكون جهد التوليد فى المحطات التقليدية فى حدود 20 kV ، أما فى محطات الطاقة الجديدة فيكون غالبا أقل من ذلك (فى محطات الرياح يصل إلى 690V فقط) .

لكن الجديد الآن أن بعض الشركات بدأت فى إنتاج مولدات الجهد العالى (High Voltage Generators) ويطلق عليها اسم Powerformers.

والمولد ذو الجهد العالى (Powerformer) كما فى الشكل 3-8 والشكل 3-9 ، هو أحد التقنيات الحديثة فى مجال توليد الطاقة الكهربائية ، وقد تم تصميم أول Powerformer بواسطة شركة ABB بسويسرا فى الخامس والعشرين من فبراير عام 1998. وتعتمد فكرة عمل الـ Powerformer على تصميم مولد لتوليد الطاقة على جهود عالية تصل إلى 400 كيلوفولت. ويتيح هذا التصميم توصيل الـ Powerformer على الشبكة الموحدة مباشرة دون الحاجة لاستخدام المحول الرافع للجهد (Step-up Transformer).



(a)



(b)

Figure 3-8

A نظام التوليد التقليدي باستخدام مولد ومحول رافع للجهد

B نظام التوليد باستخدام المولد ذو الجهد العالي (Powerformer)



Figure 3-9

المولد ذو الجهد العالي (Powerformer)

ويستخدم هذا المولد في ملفات الجزء الثابت (Stator) كابلات XLPE تتحمل الجهود العالية كما في الشكل 3-10 ، بدلا من استخدام الملفات ذات المقطع المستطيل (Rectangular Conductors) والتي تستخدم في المولدات التقليدية. أما بالنسبة للملف الدوار (Rotor) فلا يوجد أى فرق بينه وبين المولدات التقليدية من حيث التصميم.



Figure 3-10

كابلات الـ XLPE ذات الجهد العالى فى ملفات الـ Stator لا Powerformer

وفيما يلى بعض من المميزات الناتجة من استخدام الـ Powerformer:

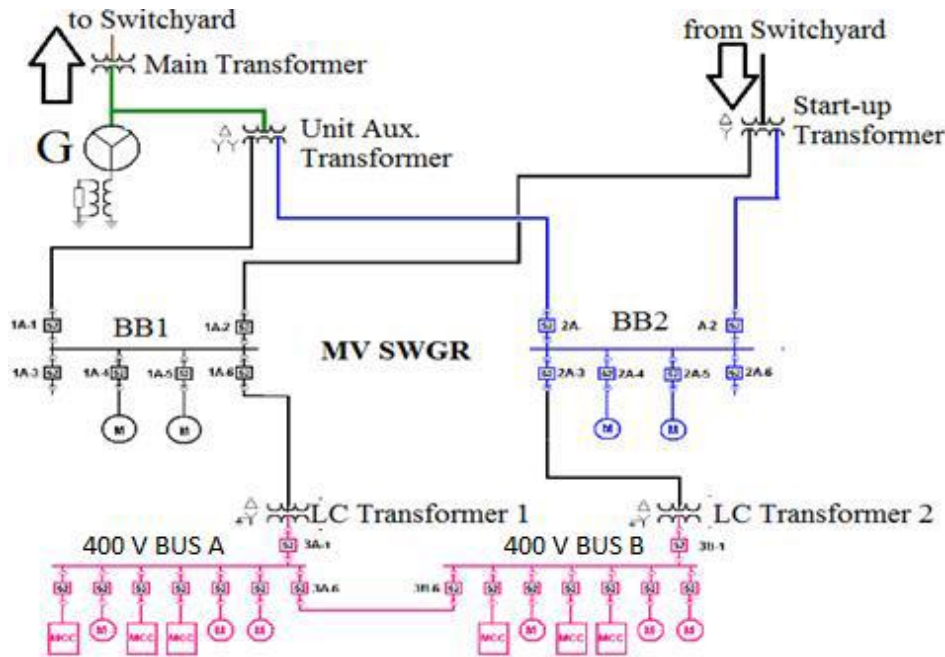
1. الكفاءة الكلية لمحطات التوليد التى تستخدم الـ Powerformer تزيد قليلا (بنسبة 1.5 بالمئة تقريبا) عن المحطات ذات المولدات التقليدية.
2. لكن الميزة الأساسية هى أن التكلفة الكلية الثابتة (Total Fixed Cost) لمحطات التوليد التى تعتمد على الـ Powerformer أقل بكثير من التكلفة للمحطات ذات المولدات التقليدية لنفس قدرات التوليد. فعلى سبيل المثال فقد تم عمل دراسة على محطة مائية فى الهند إنتاجها السنوى حوالى 3200 جيجاوات ساعة. المحطة التقليدية تتكون من 4 ترينينات مائية و 4 مولدات ، و 12 محول أحادى الوجه رافع للجهد (Single-phase Step-up Transformer). وتم عمل الدراسة عن طريق إستبدال المولدات والمحولات بـ 4 من الـ Powerformers مما أدى إلى توفير ما يقرب من 24 بالمئة من التكلفة الكلية الثابتة وكذلك تكلفة الصيانة للمحطة.
3. استخدام الـ Powerformer يؤدى إلى توفير القدرة الكهربائية غير الفعالة التى كانت ستضيع داخل محولات رفع الجهد.
4. استخدام الكابلات ذات المقطع الدائرى فى ملفات الـ Stator بدلا من الموصلات ذات المقطع المستطيل يؤدى إلى توزيع منتظم للمجال الكهربى على الكابلات داخل الـ Stator للمولد مما يؤدى للإستغلال الأمثل للمولد وإمكانية رفع جهود التوليد دون ظهور إجهادات زائدة على العزل للكابلات.

3.2 المحولات فى القسم الكهربى فى محطات التوليد

توجد أربعة أنواع رئيسية من المحولات بمحطات التوليد:

- 1- محول الرفع الرئيسى main transformer ويسمى أيضا Generator Transformer, GT
- 2- المحول المساعد (محول خفض) Unit Auxiliary Transformer, UAT يأخذ جزء من القدرة المولدة ليقوم بتغذية مساعدات المحطة على الـ BB1 and BB2 كما فى الشكل 3-11 وللذان يغذيان أيضا أحمال الجهد المنخفض.
- 3- محول بدء التشغيل (محول خفض) startup transformer ويستخدم فى حالة حدوث Blackout أو خروج كامل للوحدة حيث يأخذ قدرة من الشبكة العامة لتغذية مساعدات المحطة تمهيدا لإعادة التشغيل.
- 4- محول المجال المغناطيسى (محول خفض) excitation transformer وهو الوحيد الذى لا يظهر فى الشكل.

ويظهر الثلاثة الأول منهم فى الشكل 3-11 الذى يمثل SLD لإحدى المحطات.



مخطط للعناصر المرتبطة بالمولد الرئيسى فى محطة توليد Figure 3-11

ويوجد أيضا محولات القياس التى تستخدم فى قياس الجهد والتيار عن طريق تحويلهم لقيم مناسبة لاستخدامها عن طريق أجهزة القياس وأجهزة الوقاية.

وفى الجزء التالى نستعرض بعض تفاصيل هذه المحولات (الأرقام الواردة تخص إحدى محطة التوليد كنموذج وليس بالضرورة أن تتكرر هذه الأرقام فى كل المحطات).

3.2.1 محول الرفع الرئيسى Step up Transformer

وهو المحول الرئيسى للوحدة حيث أنه المسئول عن رفع الجهد الخارج من المولد إلى جهد شبكة النقل وأحيانا يسمى Generator Transformer وهو أكبر المحولات الأربعة السابقة من حيث القدرة وبالتالى من حيث الحجم (600 ميجا فولت أمبير فى الـ SLD).

ومعلوم أن جهد المولد يتراوح بين 15.75 إلى 23kV ، (معظم جهود التوليد فى المحطات الكبرى فى مصر تكون 15.75kV سواء كانت وحدات مائية مثل السد العالى ، أو بخارية مثل أبوقير وسيدي كير ، وحتى المركبة مثل شمال الجيزة و النوبارية) ، أما جهد شبكة النقل الرئيسية فى مصر فهو إما 220kV أو 500kV ، ومعظم محطات التوليد فى مصر تتصل على شبكة الـ 220kV ، والنسبة الأقل تتصل على شبكة الـ 500 kV (عدد المحطات الموجودة على شبكة الـ 500 kV هو 9 محطات فقط فى الشبكة المصرية)

وغالبا يتم توصيل المولد على محول الرفع مباشرة بدون قاطع للدائرة بينهما (فى كثير من المحطات وليس كلها) ومن هنا كان المسمى Generator-Transformer set .

وتتكون منظومة التبريد للمحول الرئيسى من مجموعة من مبردات الزيت يصل عددهم فى بعض الحالات إلى حوالى 22 ، بالإضافة إلى عدد 8 مراوح التبريد ، وعدد 2 مضخة لتقليب الزيت لزيادة كفاءة التبريد (الأرقام تخص محول معين وليست ثابتة فى كل المحولات) ، كما يحتوى المحول على مغير جهد من النوع off load tap changer .



3.2.2 المحول المساعد Unit Auxiliary Transformer

المحول المساعد هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد لتوفير القدرة الكهربائية اللازمة لتغذية خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV والمسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة. والمحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B). وقدرته 50 ميجا فولت أمبير في الـ SLD. ويغذى هذا المحول أيضا أحمال الجهد المنخفض بالمحطة من خلال محولين لخفض الجهد إلى 400 فولت (قدرة 2.5MVA في الـ SLD شكل 3-11).



3.2.3 محول بدء التشغيل Start Up Transformer

هو المحول المسئول عن تخفيض جهد الشبكة 220 kV لتوفير القدرة الكهربائية عند بدء التشغيل أو عند حدوث عطل في المحول المساعد أو منظومة التحويل بينهم لتغذية خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV وهي المسئولة عن تغذية مساعدات الوحدة والتي لا تستطيع الوحدة أن تبدأ أو تعمل بدونها ، والمحول يتصل بقاطع دائرة (C.B) مع بارة الـ 220 kV بمحطة المحولات. وهو أقل بالطبع في الحجم من المحول الرئيسي (قدرة 50 ميجا فولت أمبير في الـ SLD شكل 3-11).



3.2.4 محول المجال المغناطيسي Excitation transformer

ويسمى أيضا محول الإثارة هو المحول المسئول عن تخفيض جهد المولد من مثلا 23 kV إلى 900 فولت لتوفير القدرة الكهربائية اللازمة لتغذية منظومة المجال المغناطيسي Excitation والمسئولة عن توفير تيار المجال اللازم للمولد. وهذا المحول يتصل بشكل مباشر مع المولد بدون قاطع دائرة (C.B) (لم يظهر فى الأشكال السابقة لأنه يعتبر من ضمن أجزاء المولد نفسه).

3.3 الغرف والعناصر الرئيسية بمحطة التوليد

(أ) **غرفة التحكم الرئيسية** : ويتم منها التحكم فى جميع أجزاء المحطة عن بعد (عمليات المناورات) ومراقبة تحميل الدوائر والمحولات الموصلة بالمحطة .

(ب) **غرفة قواطع الجهد المنخفض (400 فولت متردد)**: وهى التى تمد محطة المحولات بمصدر التغذية للإنارة ، ودوائر التبريد للمحولات ومخارج الاستخدام للأفراد بالمحطة.

(ت) **عنبر قواطع الجهد المتوسط (11 kV)** : ويوجد به قضبان وقواطع الجهد المتوسط التى يتم توصيلها مع محولات مساعدة لخفض قيم الجهد واستخدامها لتغذية المساعدات بمحطة المحولات.

(ث) **غرفة منظومة إطفاء الحريق**:

وتوجد بها مجموعة طلمبات ضخ المياه لأغراض الحماية من الحريق سواء على منظومة إطفاء الحريق للمحولات الرئيسية أو لمأخذ المياه العمومية بالمحطة والمخصصة لتوصيل خراطيم مكافحة الحريق.

وتوجد بها بيارة رئيسية لإمداد المنظومة بالمياه وبيارة تعويض للحفاظ على ضغط المياه في الأنابيب في حالة إستعداد دائم لحالات الحريق.

ج) عنبر خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV

- هي عبارة عن خلايا تتكون من القضبان و مجموعة من القواطع الكهربائية معزولة بـ سادس فلوريد الكبريت (SF6) لتغذية مساعدات الوحدة.
- تتغذى المنظومة من أحد مصدرين : إما المحول المساعد في حالة التشغيل الطبيعي وإما محول بدء التشغيل في حالة خروج الوحدة أو حدوث عطل في المحول المساعد.

3.4 منظومات الجهد المنخفض بمحطات التوليد

3.4.1 خلايا الجهد المنخفض عالية القدرة Power Center

- هي المنظومة المسؤولة عن تغذية الأحمال عالية القدرة من 100-250 حصان ومراكز الأحمال MCC
- تتغذى عن طريق Dry Transformer جهد 6.3kV / 400V فولت وهو محول خفض له مراوح تبريد ومصدر تغذيته من خلال خلايا الجهد المتوسط 6.3 kV.
- المنظومة تتكون من أربع أو خمس خلايا تغذى كل خلية مجموعة من الأحمال.

3.4.2 خلايا الجهد المنخفض Motor Control Center

- تتكون من مجموعة من قواطع الجهد المنخفض كما في الشكل 3-12 ذات سعة القطع المختلفة لتغذية الأحمال المنخفضة التي تقل عن 100 حصان مثل
- المحركات و البلوف Motor & Valve's
 - لوحات الإنارة
 - لوحات التوزيع (PDP)
 - شواحن البطاريات Battery Charger
 - منظومة الجهد الغير منقطع UPS
- تتغذى خلايا الجهد المنخفض عن طريق مفتاح 800 أمبير يتغذى من خلايا الجهد المنخفض ذات القدرة العالية.



Figure 3-12 خلايا جهد منخفض

3.4.3 غرفة الشواحن والبطاريات :

غرفة الشواحن: وفيها يتم تحويل الجهد المتردد إلى جهد مستمر يستخدم فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ بالمحطة .

غرفة البطاريات : بها مجموعات البطاريات الحمضية المستخدمة فى تغذية دوائر الوقاية والتحكم والطوارئ (110ف) وكذلك دوائر الاتصالات (48ف).

ملحوظة هامة:

العديد من الأجهزة الموجودة داخل محطة الإنتاج من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربائية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح ، و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحيتها.

بعض المحطات فى الصين بدأت فى جعل تغذية مساعدات المحطة كلها على الـ DC system بدلا من الاعتماد على الديزل وذلك لعمل Starting للمحطة بعد الـ Blackout ، لكن هذا بالطبع سيستلزم لذلك مساحات كبيرة لتخزين البطاريات. كما فى النظام التالى الذى يمثل منظومة بطاريات بقدرة 15 MW فى الشكل 3-13.



Figure 3-13 محطة بطاريات قدرة ميجا ونصف

لمزيد من التفاصيل حول البطاريات والشواحن راجع الباب الثالث من هذا الكتاب.

3.5 المنظومات المساعدة في القسم الكهربى Auxiliary Systems

منظومة القياس (Measurement System)

وتستخدم في المحطات لقياس كل من القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والتيار والجهد ، كما توجد العديد من القياسات الأخرى التي يتم إجراؤها إما على المولد مثل درجات الحرارة المملقات ، أو قياسات على المحولات مثل قياس درجة حرارة الزيت و منسوب الزيت بواسطة مرحل بوخلز . والهدف من كل أجهزة القياس هذه ومن عدادات القدرة والطاقة هو مراقبة أداء المنظومة. وأجهزة القياس المستخدمة تتوقف على طبيعة العنصر المركبة عليه . فعلى سبيل المثال :

أجهزة القياس المركبة على المولد هي:

1. جهاز قياس الجهد (فولتميتر) ويتغذى من V.T
2. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من C.T
3. جهاز قياس معامل القدرة (P.F) ويتغذى من V.T + C.T
4. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
5. جهاز قياس الطاقة غير الفعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
6. جهاز قياس الذبذبة (Hz) ويتغذى من V.T

أجهزة القياس المركبة على خلايا الدخول

1. جهاز قياس الجهد (فولتميتر) ويتغذى من V.T
2. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من C.T
3. جهاز قياس القدرة الفعالة (وات ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
4. جهاز قياس القدرة الغير الفعالة (فار ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
5. جهاز قياس معامل القدرة (P.F) ويتغذى من V.T + C.T
6. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
7. جهاز قياس الطاقة الغير فعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
8. جهاز قياس الذبذبة (Hz) ويتغذى من V.T

أجهزة القياس المركبة على خلايا الخروج

1. جهاز قياس شدة التيار (الأميتر) ويتغذى من C.T
2. جهاز قياس الطاقة الفعالة (وات ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T
3. جهاز قياس الطاقة الغير فعالة (فار ساعة ميتر) ويتغذى من V.T + C.T

3.5.1 منظومة الاتصالات (Communication System)

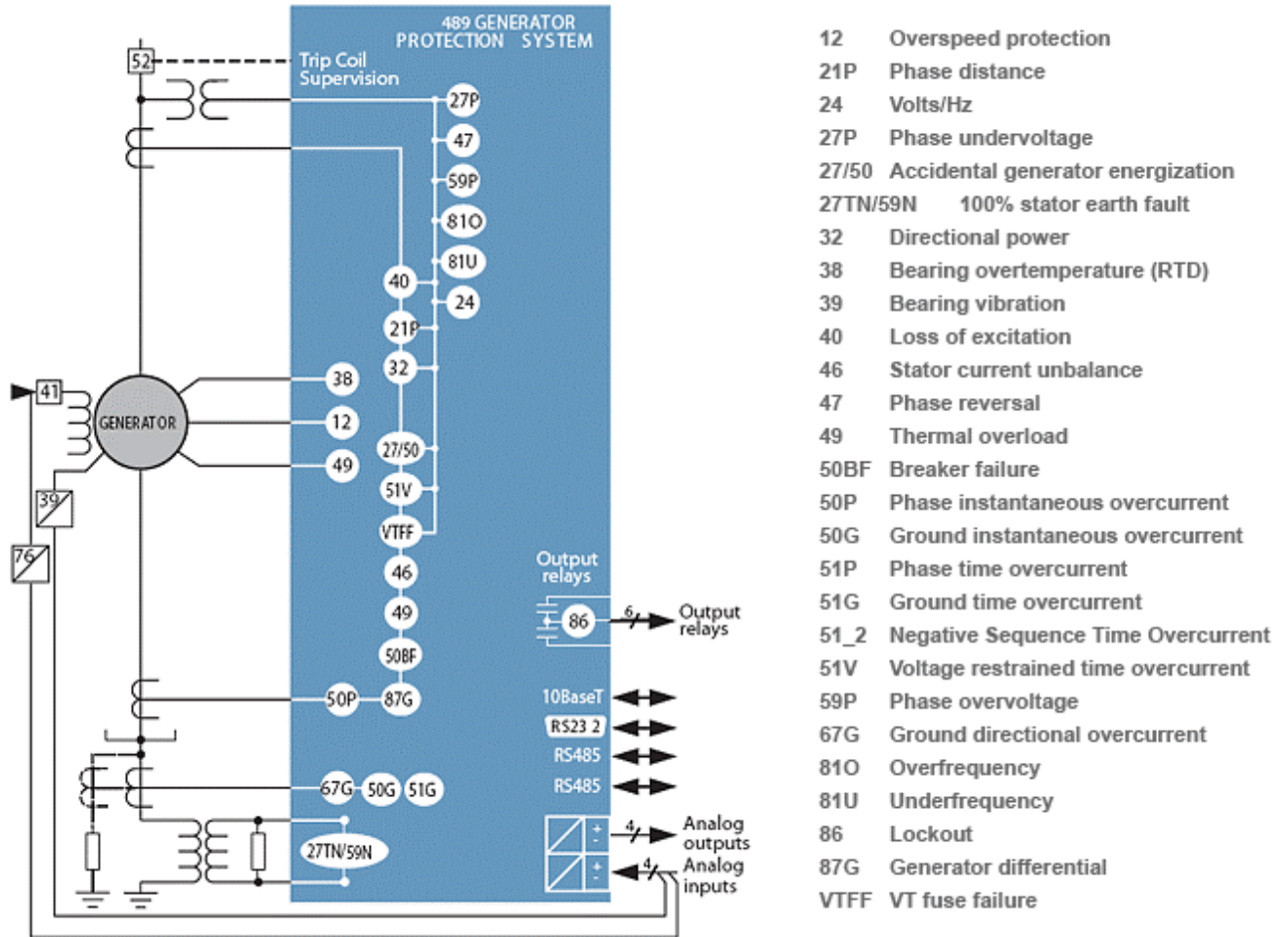
يتم عمل شبكة اتصالات بين وحدات المحطة نفسها ، وأيضا بين المحطة وغيرها من المحطات ، وهذه المنظومة هى التي تقوم بنقل البيانات من كافة أجزاء المحطة إلى غرفة التحكم بالمحطة ، كما تنتقل أوامر التشغيل من مركز التحكم القومى إلى المحطة. راجع تفاصيل ذلك فى الباب الثالث من الكتاب.

3.5.2 نظام التحكم (Control System)

من خلاله يتم التحكم فى كل المعدات والعناصر الهامة فى المحطة حيث يتم التحكم فى المولدات وفى معدل سريان القدرة والقدرة المتولدة من الوحدة وغيرها تبعا للتحميل على الشبكة. وهناك نظامان للتحكم (قديم وحديث) ويحسن الرجوع للتفاصيل فى الفصل الخاص بنظم التحكم الموجود بالباب الثالث من هذا الكتاب. وكل دوائر التحكم يتم توصيلها فى النهاية إلى غرفة التحكم المركزي بالمحطة للمتابعة والمراقبة.

3.5.3 منظومة الحماية:- (Protection System)

منظومة الحماية هي من أهم المنظومات بالمحطة. والشكل 3-14 يمثل نموذجا لمنظومة الحماية الكاملة على أحد المولدات. ويحسن الرجوع لكتاب نظم الحماية لتفصيل هذا الموضوع.



منظومة حماية المولد 3-14 Figure

نموذج للقسم الكهربى فى محطة توليد غازية

والمحطة التى نعرض تفاصيلها هنا مكونة من أربع وحدات توليد غازية (Simple cycle) قدرة كل وحدة 150 ميجا وات ، وأربعة محولات رافعة للجهد من 66kV إلى 220kV للربط بالشبكة ، مع نظام لتوزيع الجهد المنخفض والجهد المتوسط والجزء الخاص بالـ common service building كما هو موضح بالـ Single Line Diagram الخاص بالمحطة.

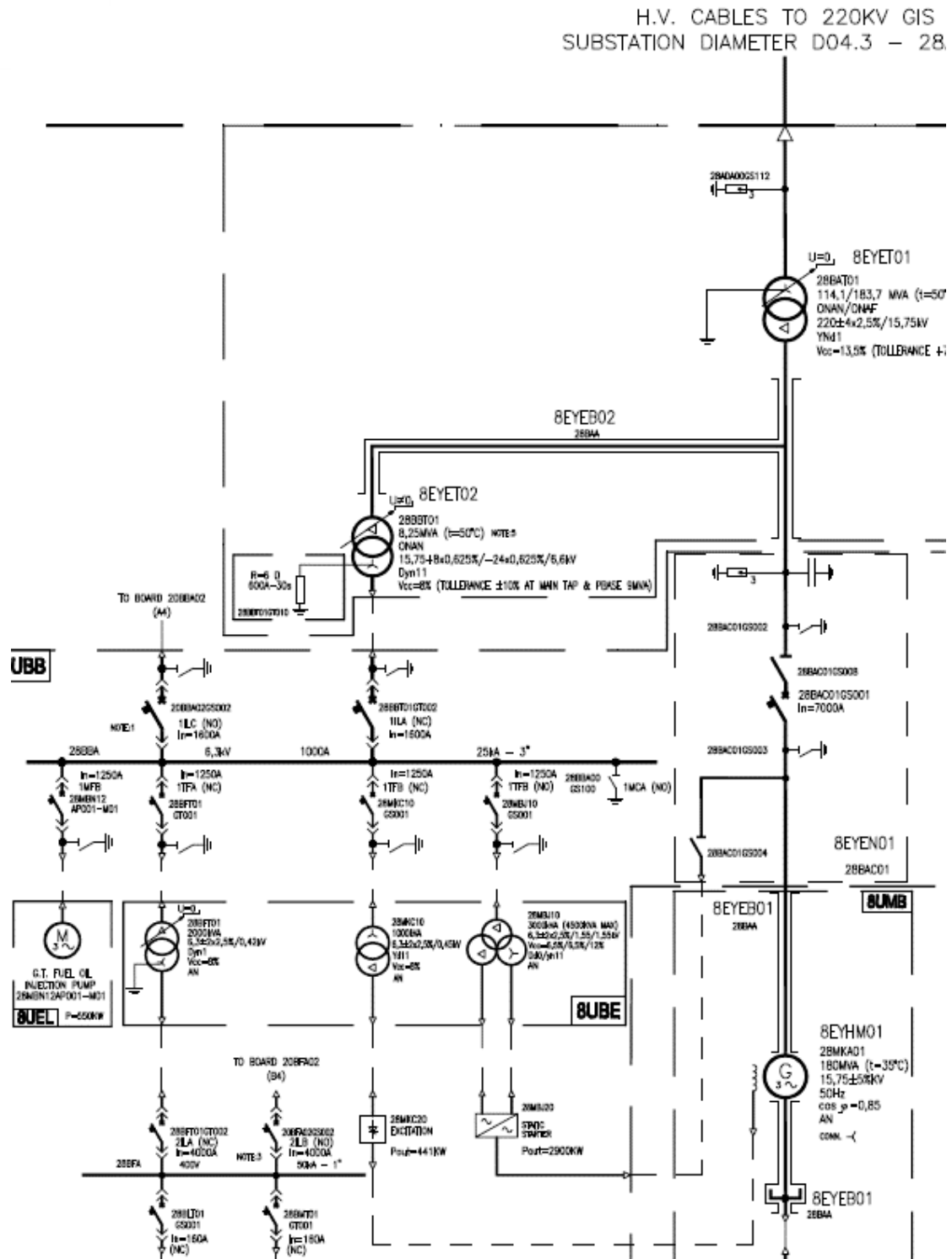
3.6 مكونات النظام الكهربى فى محطة توليد غازية:

- مولدات
- قواطع كهربية خاصة بكل مولد
- محولات رافعة للجهد
- يفصل بين كل مولد ومحول bus duct
- محولات خافضة للجهد من 15.75 KV إلى 6.3 KV (MV TR.)
- محولات خاصة بنظام الـ (excitation) للمولد متصلة بـ bus bar الجهد المتوسط
- و متصلة أيضا بالـ (exciters) الخاص بالمولد
- محولات (3 winding) خاصة بتشغيل المولد (static starter) متصلة بـ bus bar الجهد المتوسط
- مضخات لضخ الوقود (3-phase Motor 550KW) – UEL
- USG – Fire fighting pump 200KW
- محولات خافضة للجهد من 6.3KV إلى 400 فولت (LV TR.)
- وحدات توزيع للجهد المتوسط MV bus bar لتغذية محولات الخاصة بتشغيل المولد والخاصة بالـ (excitation) ومحولات الجهد المنخفض وتغذية الـ motors الخاصة بالـ oil pumps والـ motor الخاص بـ fire fighting pump
- وحدات توزيع للجهد المنخفض LV bus bar لتغذية الـ Rectifiers المسئولة عن شحن بطاريات تغذية نظام الـ UPS ليدخل الخدمة في حالات الطوارئ
- نظام الـ UPS يتم تغذيته عن طريق DC bus bar الذى يغذى بدوره الـ inverters الذى يقوم بتغذية نظام الـ UPS
- مولد ديزل للطوارئ

3.6.1 كيفية عمل المحطة من الناحية الكهربائية:

كما ذكرنا في السابق في نظرية عمل المحطة أن الـ compressor مرتبط مع الـ turbine والمولد على نفس الـ shaft فيجب علينا بدء تحريك الـ turbine ولتحريك الـ turbine يلزم تشغيل الـ compressor لبدء عملية الاحتراق الداخلي فتكون خطوات التشغيل كالآتي (الحديث عن وحدة التوليد 28MKA01 في الشكل 3-15):

- نقوم بفتح C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS001 الذي يربط بينه وبين المحول الخاص بالربط بالشبكة 2XBAT01
- نقوم بفتح C.B الخاص بالمولد 2XBAC01GS004 الذي يربط بينه وبين المحول المسئول عن بدء تشغيل المولد 2XMBJ01
- يقوم المحول 2XBAT01 بتغذية المحول الخاص بشبكة الجهد المتوسط 2XBBT01 (بسحب Power من الشبكة) فتتم تغذية المحول 2XMBJ01 المسئول عن تشغيل المولد فتتم تغذية المولد ليعمل كموتور (motor) فيدور الـ shaft ويتم تحريك الـ turbine فيبدأ الـ compressor بالعمل فيتم ضخ الهواء إلى combustion room فيبدأ احتراق الوقود فتبدأ الـ turbine بالحركة من تأثير العادم الخاص بالوقود و نقوم بفصل الـ Power عن المولد عن طريق فتح الـ C.B 2XBAC01GS004 فتقوم الـ turbine بلف الـ shaft حتى يصل للـ rated speed الخاصة بالمولد ثم نقوم بتغذية المحول الخاص بالـ excitation 2XMKC10 عن طريق غلق الـ C.B 2XBBT01GT001 & 2XMKC01GT001 فيبدأ المولد بالعمل ليصل إلى الـ synchronous speed ويبدأ بعملية التوليد حتى يصل المولد إلى لحظة التزامن بالشبكة فيتم الربط بالشبكة.
- في حالة الـ black out أو عدم وجود Power في الشبكة يقوم مولد الديزل XJ*0120 بدور المحول 2XBAT01.



4

محطات التوليد النووية

محطات التوليد النووية هي نوع من محطات التوليد الحرارية ، لأنها تعمل بنفس المبدأ وهو توليد البخار بالحرارة ثم يقوم هذا البخار بتدوير التوربينات التي بدورها تدير الجزء الدوار من المولد الكهربائي وتتولد الطاقة الكهربائية على أطراف الجزء الثابت من هذا المولد.

والفرق الرئيسي بين المحطات البخارية التقليدية والمحطات النووية هو أنه في محطات التوليد النووية يستبدل الفرن الذي يحترق فيه الوقود بمفاعل نووي Reactor تتولد فيه الحرارة نتيجة انشطار ذرات اليورانيوم وتستغل هذه الطاقة الحرارية الهائلة في تبخير المياه في الغلايات وتحويلها إلى بخار ذي ضغط عالٍ ودرجة حرارة مرتفعة جدا .

والعجيب أن حقيقة أن الحجارة يمكن أن تصبح وقوداً لنار جهنم كانت شيئاً مستغرباً في قول الله سبحانه وتعالى في كتابه العزيز: (يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا قُوا أَنْفُسَكُمْ وَأَهْلِيكُمْ نَارًا وَقُودُهَا النَّاسُ وَالْحِجَارَةُ عَلَيْهَا مَلَائِكَةٌ غِلَظٌ شِدَادٌ لَا يَعْصُونَ اللَّهَ مَا أَمَرَهُمْ وَيَفْعَلُونَ مَا يُؤْمَرُونَ (6)) التحريم. وها نحن اليوم نعيش في العصر الذي استخدم البشر فيه الحجارة التي تحتوي على عناصر اليورانيوم والثوريوم كوقود ينتج كميات هائلة من الحرارة التي تحول هنا في المحطات النووية إلى طاقة كهربائية.

والمفاعل Reactor يحتاج إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذري ولذا فهو يتكون من طبقة من الآجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية. وكانت أول محطة توليد حرارية نووية في العالم نفذت في عام 1954 وكانت في الاتحاد السوفيتي بطاقة 5 ميجاوات . ولا توجد محطات توليد نووية مستعملة في البلاد العربية حتى الآن.

4.1 أساسيات المحطات النووية

4.1.1 طاقة الربط النووي

تتكون نواة الهيليوم من بروتونين ونيوترونين ، وكان من المفترض أن يكون العلاقة بينهم كما في الشكل 4-1:

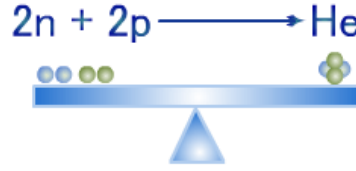


Figure 4-1

ولكن بمراجعة الأوزان الفعلية تبين أن:

- تبلغ كتلة نواة الهيليوم 4.0015 وحدة كتلة ذرية .
- تبلغ كتلة البروتون 1.0073 وحدة كتلة ذرية .
- تبلغ كتلة النيوترون 1.0087 وحدة كتلة ذرية .

وبما أن نواة الهيليوم تتألف من بروتونين ونيوترونين ، لذا يمكن حساب كتلة نواة الهيليوم على النحو التالي :

$$\text{كتلة بروتونين} = 1.0073 \times 2 = \text{كتلة نيوترونين} = 1.0087 \times 2$$

$$\text{كتلة بروتونين} = 2.0146 = \text{كتلة نيوترونين} = 2.0174$$

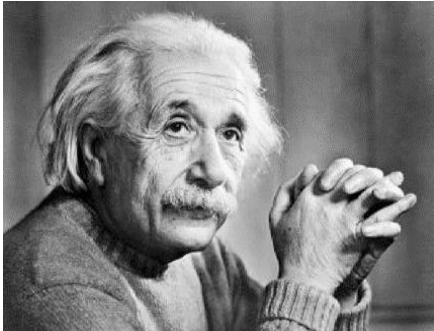
$$\text{مجموع كتل البروتونات والنيوترونات} = 2.0146 + 2.0174$$

$$= 4.0320 \text{ وحدة كتلة ذرية}$$

وبمقارنة كتلة الهيليوم الفعلية بمجموع كتل مكونات نواتها يلاحظ أن هنالك فرقاً في الكتلة كما في الشكل 4-2 :



Figure 4-2



يبلغ الفرق في الكتلة بين نواة الهيليوم الفعلية ومجموع مكوناتها 0.0305 وحدة كتلة ذرية ، وقد تمكن الفيزيائي الألماني الأمريكي الشهير ألبرت أينشتاين (Albert Einstein 1879-1955) في عام 1907م من خلال التحليل الرياضي البحت أن يثبت أن الطاقة (energy) ، والمادة (mass) ما هما إلا وجهان لعملة واحدة أي أن المادة يمكن أن تتحول إلى طاقة والطاقة يمكن أن تتحول إلى مادة.

ولقد تمكن أينشتاين من وضع معادلته المشهورة

$$E = m C^2$$

وتدعى هذه الطاقة بطاقة الربط النووي BINDING ENERGY.

فعلى سبيل المثال فإن الطاقة النووية الناتجة عن تحويل جرام واحد من المادة بكامله إلى طاقة يساوي 85 ألف مليون وحدة حرارية بريطانية BTU ، والذي يساوي 25 مليون كيلوات ساعة ، أو ما يعادل الطاقة الناتجة عن حرق ما يقرب من خمسة آلاف طن من الفحم الحجري.

ملحوظة هامة:

1. عند انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم 235 فإن الفرق بين كتلة المادة قبل وبعد عملية الانشطار يساوي جرام واحد أى أن جراما واحدا تحول إلى طاقة وبقي 999 جرام كنفايات ، ولذا قد تجد نفس العبارة السابقة مذكورة فى مرجع آخر ولكن بدلا من كلمة جرام ستجد كلمة كيلو جرام ولذا يجب التمييز .

2. محطة توليد كهربائية بقدرة ألف ميغاوات تحتاج يوميا لتشغيلها إلى كيلوجرامين فقط من اليورانيوم 235 القابل للانشطار (المخصب فعليا). وهذه الكمية من الوقود يمكن توفيرها من خلال تزويد المفاعل بخمسين كيلوجرام من اليورانيوم المخصب بنسبة أربعة بالمئة (18 طن سنويا وتصل إلى 30 طن إذا نسبة التخصيب أقل) ، وتبقى هذه الكمية من الوقود قليلة جدا بالمقارنة مع 3 مليون طن من الفحم الحجري تلزم لتشغيل نفس المحطة سنويا.

4.1.2 فكرة الطاقة النووية

تفاعل الانشطار النووي هو التفاعل الذي يتم من خلاله إنتاج طاقة حرارية وضوئية عالية بالإضافة إلى جسيمات مثل بيتا (β) وألفا (α). ويتم تحرير الطاقة النووية من خلال قصف نواة اليورانيوم 235 بنيوترون كما فى الشكل 3-4 ، ينتج عن هذا التصادم جزيء جديد غير مستقر سرعان ما تنشط إلى جزيئين ، بالإضافة إلى 2 إلى 3 نيوترونات ، والتي بدورها ستصطدم بذرات يورانيوم أخرى ، وبالإضافة إلى المنتج الأهم وهو الطاقة الحرارية.

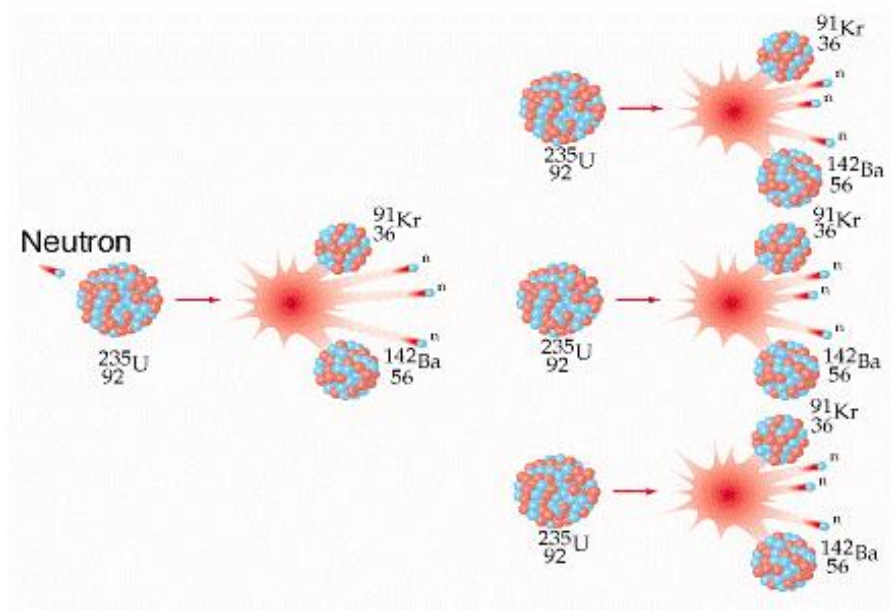


Figure 4-3 التفاعل المتسلسل

وهكذا تستمر عملية تحرير الطاقة وإنتاج نيوترونات ضمن ما يعرف بالتفاعل المتسلسل. وتبلغ كمية الطاقة التي تنبعث جراء انشطار ذرة واحدة من اليورانيوم 235 حوالى مائتين وإثنين مليون إلكترون فولت ($1 \text{ MeV} = 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$). والأمثلة التالية هامة جدا فى تقدير حجم الطاقة المحررة من هذه التفاعلات النووية.

Example 2.17. An atomic power reactor can deliver 300 MW. If due to fission of each atom of $^{235}_{92}\text{U}$, the energy released is 200 MeV, calculate the mass of uranium fissioned per hour.

Solution.

Energy received from the reactor

$$= 300 \text{ MW} = 3 \times 10^8 \text{ W (or Js}^{-1}\text{)}$$

$$\text{Energy received/hour} = (3 \times 10^8) \times 3600 = 108 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\text{Energy released/fission} = 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Number of atoms fissioned per hour

$$= \frac{108 \times 10^{10}}{3.2 \times 10^{-11}} = 33.75 \times 10^{21}$$

Now 1 gram-atom (i.e., 235g) has 6.023×10^{23} atoms.

∴ Mass of Uranium fissioned per hour

$$= \frac{235}{6.023 \times 10^{23}} \times 33.75 \times 10^{21} = \mathbf{13.17g}$$

Example 2.18. What is the power output of a ${}_{92}\text{U}^{235}$ reactor if it takes 30 days to use up 2 kg of fuel? Given that energy released per fission is 200 MeV and Avogadro's number = 6.023×10^{26} per kilomole.

Solution.

$$\text{Number of atoms in 2 kg fuel} = \frac{2}{235} \times 6.023 \times 10^{26} = 5.12 \times 10^{24}$$

These atoms fission in 30 days. Therefore, the fission rate (i.e., number of fissions per second)

$$= \frac{5.12 \times 10^{24}}{30 \times 24 \times 60 \times 60} = 1.975 \times 10^{18}$$

$$\text{Energy released per fission} = 200 \text{ MeV} = (200 \times 10^6) \times 1.6 \times 10^{-19} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

∴ Energy released per second i.e., power output P is

$$P = (3.2 \times 10^{-11}) \times (1.975 \times 10^{18}) \text{ W}$$

$$= 63.2 \times 10^6 \text{ W} = \mathbf{63.2 \text{ MW}}$$

تنتج مفاعلات الطاقة النووية كمية هائلة من الطاقة الكهربائية من كمية صغيرة من الوقود فبضعة جرامات من اليورانيوم تعطي كمية من الطاقة تكافئ ما ينتجه طن واحد من الفحم. وهي كمية تكفي لتشغيل كهرباء منزل لمدة أربعة أشهر تقريباً ، دون أي انبعاث للكربون. (ملحوظة : إنتاج 1 جيجاوات ساعة من محطة تعمل بالفحم ينتج عنها انبعاث 1041 طن من CO_2).

4.1.3 تخصيب اليورانيوم

على الرغم من أن جميع أنوية ذرات العناصر تحتوي على كميات متفاوتة من هذه الطاقة الكامنة إلا أن العلماء لم يتمكنوا من الحصول عليها إلا من خلال شطر أنوية بعض العناصر الثقيلة كاليورانيوم 235 (Uranium 235) المتوفر في الطبيعة ، والبلوتونيوم 239 (Plutonium 239) المصنع من اليورانيوم 238 ، واليورانيوم 233 (Uranium 233) المصنع من الثوريوم 232 (Thorium 232) ، وذلك من خلال عمليات الانشطار النووي (nuclear fission) .

ويتميز اليورانيوم 235 عن غيره بأن انشطار ذرته لا يتطلب طاقة عالية للنيوترونات المقذوفة بل أن الانشطار قد يتم بالنيوترونات الحرارية أو البطيئة والتي تقل طاقتها عن نصف إلكترون فولت.

وبصفة عامة ، تعتمد شدة التفاعل النووي المتسلسل على نسبة اليورانيوم - 235 في الوقود النووي ، فكلما كان اليورانيوم نسبته عالية كانت كمية الطاقة الناتجة أعلى ، ومن هنا تكمن الحاجة لفصل نظائر اليورانيوم عن بعضها للحصول على اليورانيوم - 235 أنقى وهذه العملية تسمى بعملية تخصيب اليورانيوم (enrichment process).

ملحوظة:

أن نسبة اليورانيوم القابل للإنشطار وهو اليورانيوم 235 في اليورانيوم الطبيعي نسبة متدنية لا تتجاوز سبعة بال عشرة بالمئة ولهذا فإنه يلزم رفع هذه النسبة بمقدار يتحدد من نوع الاستعمال. ففي القنابل الذرية يلزم أن تكون النسبة أعلى من تسعين بالمئة بينما تحتاج المفاعلات النووية الصغيرة (compact nuclear reactors) المستخدمة في الغواصات وحاملات الطائرات إلى نسب تصل إلى عشرين بالمئة وأما معظم أنواع المفاعلات النووية والتي

تعمل بالماء الخفيف فتعمل بنسب تتراوح بين 3% و 5% بينما يعمل بعضها باستخدام اليورانيوم الطبيعي كمفاعلات الماء الثقيل.

ومن الصعب فصل نظائر اليورانيوم عن بعضها بطرق كيميائية لأن نظائر العنصر الواحد متشابهة في السلوك الكيميائي ، إلا أن اختلاف النظائر في السلوك الفيزيائي يسهل علينا فصلها عن بعضها ، فالنظيرين اليورانيوم – 235 ، واليورانيوم – 238 يختلفان عن بعضهما في الكتلة.

والعلماء الذين عملوا على صناعة القنبلة النووية اكتشفوا العديد من الطرق لفصل نظائر اليورانيوم ، منها آلات الطرد المركزي التي استخدمها العلامة عبد القدير خان (أبو القنبلة الذرية في باكستان) ، ومنها أيضا طريقة الانتشار الغازي والتي تعتمد على الاختلاف البسيط في الانتشار خلال غشاء شبه منفذ بين اليورانيوم – 235 و اليورانيوم – 238 $^{92}\text{U}238$ مما يؤدي إلى اتخاذ كل منهما مسارين مختلفين عند التأثير عليهما بمجال كهرومغناطيسي مما يؤدي إلى فصلهما.

ويتطلب تخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 5% حوالى عشرة كيلوجرامات من اليورانيوم الطبيعي بينما يلزم لتخصيب كيلوجرام واحد من اليورانيوم بنسبة 90% إلى ما يزيد عن 150 كيلوجرام من اليورانيوم الطبيعي. ويطلق على اليورانيوم الطبيعي غير المخصب الناتج عن عملية التخصيب باليورانيوم المنضب (depleted Uranium) حيث أنه يحتوي على نسبة متدنية من اليورانيوم 235 لا تتجاوز ثلاثة بال عشرة بالمئة أي أنها أقل من تلك في اليورانيوم الطبيعي. وعملية التخصيب مكلفة جدا ولذلك فإن سعر الكيلوجرام الواحد من اليورانيوم المخصب بنسبة 5 % قد يصل إلى ألفي دولار.

4.1.4 مكونات المفاعل النووي

الشكل 4-4 يظهر فيه مكونات المفاعل كما يلي:

1. **مركز المفاعل أو قلب المفاعل** وهو الجزء الذي يحتوي على وحدات الوقود النووي وتتم فيه سلسلة الانشطار النووي.
2. **السائل المهدئ moderator** ويستعمل الماء عادة لخفض سرعة النيوترونات وبالتالي معدل الانشطار النووي كما أنه ينقل الحرارة الناتجة من التفاعل النووي ويتحول جزء منه إلى بخار عالى الضغط ، يستغل في تشغيل التوربين .
3. **هيكل الاحتواء** : يحتاج المفاعل إلى جدار عازل وواق من الإشعاع الذي وهو يتكون من طبقة من الآجر الناري وطبقة من المياه وطبقة من الحديد الصلب ثم طبقة من الأسمنت تصل إلى سمك متر ونصف أو مترين وذلك لحماية العاملين في المحطة والبيئة المحيطة من التلوث بالإشعاعات الذرية .
4. **مبادلات حرارية** يخرج بخار الماء بضغط يبلغ 400 ضغط جوي وتكون درجة حرارته نحو 450 درجة مئوية بواسطة أنابيب متينة من المفاعل إلى المبادلات لفصل دائرتي الماء ، فالدائرة الأولى التي تلف

في المفاعل وهذه تكون عالية الإشعاع نظرا لتلامسها مع الوقود النووي .لذلك تُفصل عن الدائرة الثانية للماء الساخن المضغوط ، ويتحول هذا الماء في الدائرة الثانية عند مغادرته المبادل الحراري إلى بخار ماء عالي الضغط والحرارة ويوجه إلى توربين لتوليد الكهرباء .

5. مولد كهربائي عملاق يديره التوربين ويولد التيار الكهربائي

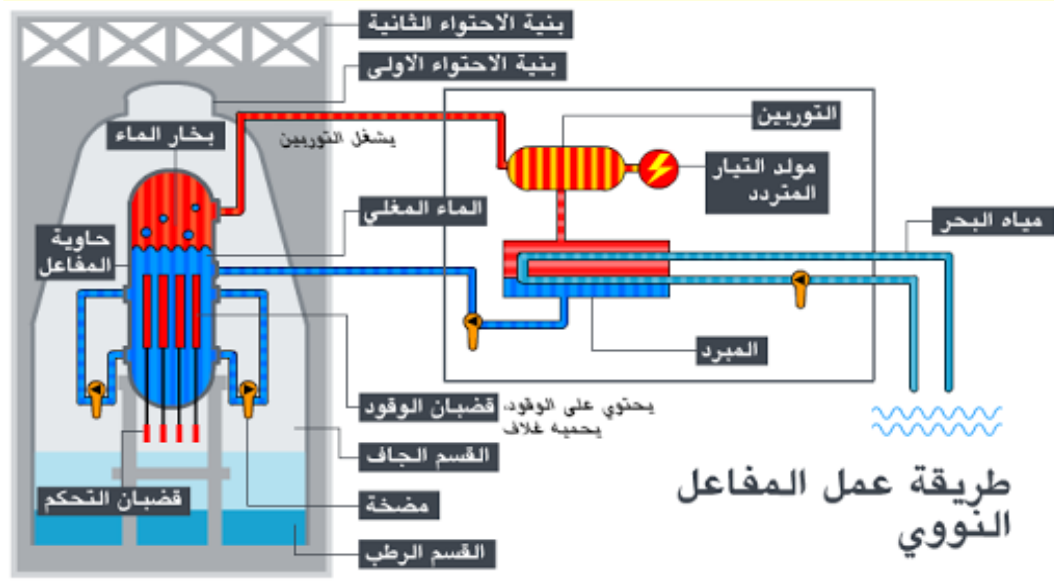


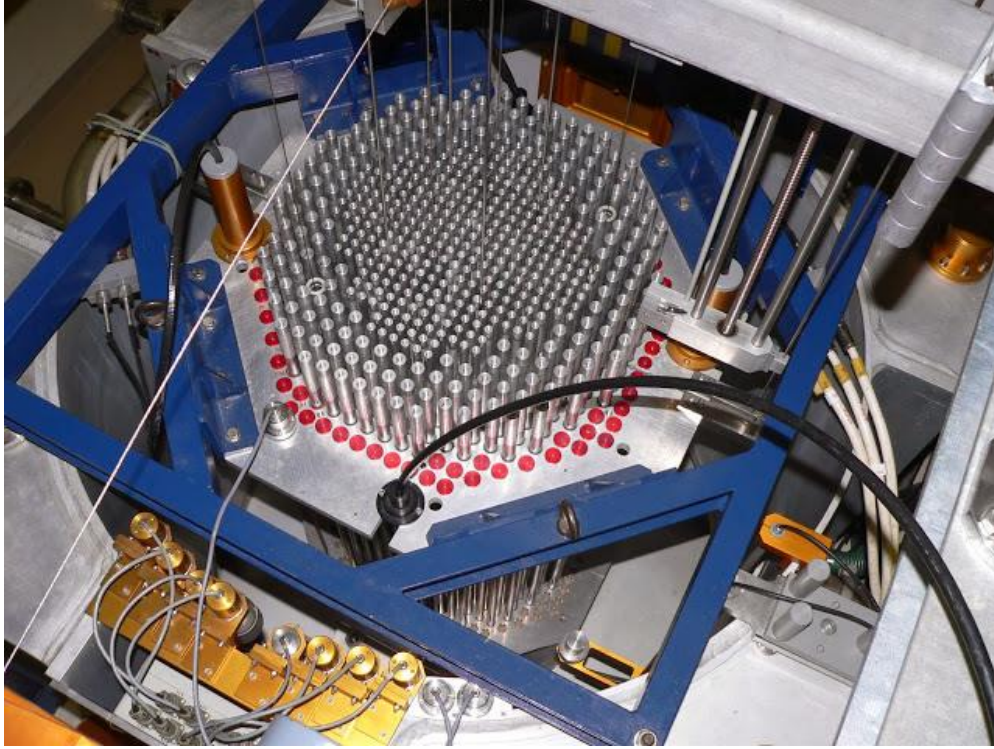
Figure 4-4

وبذلك تتحول الطاقة النووية إلى طاقة حرارية ثم إلى طاقة حركة للتوربين والمولد الكهربائي الذي يحولها إلى طاقة كهربائية لتشغيل المصانع وإنارة المنازل.

وداخل المفاعل النووي من الداخل توجد أيضا أعمدة الوقود (شكل 4-5) ، وهي تحتوي على نسبة تخصيب 3 إلى 5 في المئة من اليورانيوم 235 . وداخل المفاعل أيضا يوجد المهدئ وهو أما الماء الخفيف أو الثقيل ووظيفته أنه يقوم بتقليل سرعة النيوترونات لغرض الوصول إلى السرعة المطلوبة لحدوث التفاعل المتسلسل. فالنيوترونات السريعة جدا لا يمكن لها أن تتشطر نواة اليورانيوم 235.

ويتكون قضيب الوقود من أنبوبة من الفولاذ لا يتجاوز قطرها الداخلي السنتيمتر الواحد وسمكها عدة ملليمترات وبطول قد يصل إلى خمسة أمتار وتعبأ بقطع من المخصب على شكل أقراص أسطوانية صغيرة (pellets) حيث يصل وزن القضيب بعد التعبئة إلى عدة كيلوغرامات. وعادة ما يتم جمع قضبان الوقود على شكل حزم (fuel assemblies) تتألف الحزمة الواحدة ما بين 200 و 300 قضيب وقود ليسهل إدخالها وإخراجها من قلب المفاعل دفعة واحدة. ويتراوح عدد الحزم ما بين 150 و 250 حزمة أي أن المفاعل قد يحتوي على 50 إلى 150 طن من اليورانيوم الطبيعي أو المخصب. و هذه الكمية من الوقود تكفي لتشغيل المفاعل لمدة قد تصل

إلى سنتين مما يعني أن تغذية المفاعل تتم كل سنة أو سنتين وعادة ما يتم إيقاف المفاعل بشكل كامل لتزويده بالوقود



صورة لقلب المفاعل تظهر فيها قضبان الوقود Figure 4-5

4.2 مخاطر المفاعلات

حدث خلل فني في نظامي التهدة والتبريد يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى 1200 درجة مئوية ، ويمكن عندها أن تنفصل جزيئات الهيدروجين عن الماء. وإذا ما تم إطلاق البخار المحمل بالهيدروجين من المفاعل فإنه يتفاعل مع الأكسجين في الهواء ويؤدي إلى حدوث انفجار ، مثلما حدث مؤخراً في مفاعل فوكوشيما الياباني.

أما ارتفاع درجة الحرارة في قلب المفاعل إلى 2200 درجة مئوية فسيؤدي إلى انصهار أعمدة الوقود النووي. مثلما كان عليه الحال في مفاعل تشيرنوبل الروسي.

وهناك مشكلة أخرى تكمن في كيفية التخلص من المخلفات النووية الناتجة في المفاعلات النووية. وعادة ما يوضع اليورانيوم المستهلك في أحواض مائية كبيرة لمدة عشرات السنين لغرض تخفيض إشعاعها النووي إلى حد يسهل معاملتها صناعياً بعد ذلك

علما بأن كمية النفايات المشعة نتيجة الانشطار النووي بمحطات إنتاج الكهرباء بالمفاعلات النووية محدودة مقارنة بكمية النفايات بالمحطات الحرارية التي تعمل بالطاقة الأحفورية كالنفط أو الفحم. فالنفايات النووية تصل 3 ميليجرام لكل كيلو وات ساعة (3mg/kWh) مقابل حوالي 700 جرام ثاني أكسيد الكربون لكل كيلو وات ساعة بالمحطات الحرارية العادية لكن هذه الكمية الصغيرة جدا من الإشعاع النووي قد تكون قاتلة أو قد تتسبب في عاهات وتشوهات لا علاج لها. لهذا فإن جميع الدول التي تستخدم الطاقة النووية لإنتاج الطاقة الكهربائية تعمل على التخلص من تلك النفايات المشعة بدفنها في الطبقات الجيولوجية العميقة تحت سطح الأرض بعيدا عن الناس

4.2.1 هل يمكن أن تنفجر المفاعلات النووية كالقنابل؟

لا يمكن أن ينفجر المفاعل النووي مثل القنبلة ، فمستوى تخصيب اليورانيوم منخفض جداً ، وهو أقل بكثير من عملية التخصيب المطلوبة لإنتاج الأسلحة النووية. وقد تم تصميم هذه المفاعلات لإنتاج الطاقة الكهربائية بشكل آمن وموثوق.

4.2.1 ما هو الماء الثقيل؟

كيميائيا الماء الثقيل هو نفس الماء الخفيف (العادي) ولكن الاختلاف هو في أن ذرتي الهيدروجين في الماء العادي (H_2O) تستبدل بذرتي ديوتيريوم (deuterium atoms) ويرمز له بـ (D_2O) الديوتيريوم هو عبارة عن نظير للهيدروجين وهو يحتوي على نيوترون إضافي ولذلك فإن ذرة الديوتيريوم تتكون من بروتون ونيوترون وحيدتين في نواة الذرة والكثرون واحد يدور حولها. إذا فالنيوترون الزائد هو الذي يجعل من الماء الثقيل ثقيلًا فهو تقريبا أثقل من الماء العادي بمقدار 10%.

وفائدة الماء الثقيل - في المفاعلات الذرية - تكمن في قدرته العالية على التحكم بطاقة النيوترونات المنطلقة من التفاعل الذري. كما أنه يعمل كمبرد لقلب المفاعل وينقل الحرارة بفعالية لتحويلها إلى طاقة بخارية مفيدة. ورغم قدرة الماء العادي على لعب هذه الأدوار إلا أن الماء الثقيل أكثر منه سرعة وفعالية.

4.2.2 ما هو مفاعل كندو؟

مفاعل كندو هو مفاعل نووي ينتج الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة النووية وصممه وشيخته كندا . وهو يعمل باليورانيوم الطبيعي غير المخصب مع الماء الثقيل. واسم CANDU هو اختصار للاسم الكامل Canada Deuterium Uranium reactor

يتميز الماء الثقيل بأنه ضعيف الامتصاص للنيوترونات مما يحافظ على كثافة النيوترونات في قلب المفاعل، أما الماء العادي فهو يمتص النيوترونات، ولذا كان لا بد في مفاعلات الماء الخفيف أن يعوض المفاعل تلك النيوترونات المفقودة عن طريق زيادة نسبة اليورانيوم-235 لإبقاء معدل التفاعل على مستواه.

والفكرة هنا أن اليورانيوم الطبيعي يتكون من مخلوط لعدة نظائر ويغلب فيه اليورانيوم-238 ونسبة صغيرة من اليورانيوم-235. ينشط اليورانيوم-238 بالنيوترونات السريعة ذات طاقة أكبر من 1 مليون إلكترون فولت. ولكن لا يمكن أن يستمر التفاعل مع اليورانيوم-238 حيث يمتص نيوترونات أكثر مما يصدره، فلا يمكن لليورانيوم الطبيعي القيام بتفاعل تسلسلي بمفرده.

وحل هذه المشكلة يكون عن طريق تهدئة سرعة النيوترونات بحيث يرتفع احتمال اصطدامها بأنوية اليورانيوم-235 مما يتيح الفرصة لاستمرار التفاعل في المفاعل. ولهذا نحتاج إلى مهدئ لسرعة النيوترونات، الذي يقوم بامتصاص جزءا من طاقة حركة النيوترونات فتتخفض سرعتها إلى سرعة جزيئات المهدئ نفسها. وهذا هو دور الماء الثقيل.

ملحق الفصل الرابع : نبذة عن تاريخ القنبلة الذرية

في عام 1934 اكتشف عالم ألماني أن انشطار ذرة اليورانيوم يحدث بسرعة ، ويولد كمية هائلة من الطاقة ، ويمكن أن يحدث انفجاراً هائلاً . أخذ الألمان بتطوير هذه الفكرة والاستفادة منها في تصنيع القنبلة النووية ، لم يسترع ذلك اهتمام أحد إلى أن قامت ألمانيا بإيقاف تصدير اليورانيوم من مناجم تشيكوسلوفاكيا المحتلة من قبل الألمان .

في الثاني من أغسطس 1939 ، وقبل بدء الحرب العالمية الثانية ، قام ألبرت اينشتاين Albert Einstein بكتابة رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت Franklin D . Roosevelt واصفاً فيها الطاقة الهائلة التي تنتج عن الانشطار النووي ، ومعبراً فيها وزملاءه عن قلقهم الشديد من إمكانية تحويل ألمانيا النازية إلى انشطار النووي إلى قنبلة نووية. (اينشتاين عالم ألماني المولد ، يهودي الديانة ، وكان معارضا لاستغلال الطاقة النووية لتصنيع الأسلحة) .

عقد قادة الجيش الأمريكي العزم على امتلاك هذه التقنية مهما كلف الأمر ، فأخذوا يبحثون عن بناء يصلح كمختبر لإنتاج القنبلة النووية ، بحيث يبعد الموقع (200) ميل على الأقل عن الحدود البحرية والدولية ، ويجب أن يبعد كثيراً عن التجمعات السكانية ، لأن أي خطأ قد يكلفهم الكثير من الخسائر البشرية . استقر رأيهم على منطقة في أرض صحراوية في ولاية نيومكسيكو في منطقة تعرف باسم del Jornada Muerto وتعني رحلة إلى الموت ، في مشروع عرف بإسم مشروع مانهاتن السري Manhattan Project .

عمل في هذا المشروع العديد من العلماء ، وأغلبهم من ألمانيا. لم يكن أحد من العلماء على دراية بما سيحدث بعد بدء التفاعل النووي ، حتى أن أحد العلماء اعتقد أن ولاية نيومكسيكو ستختفي حينئذ من الوجود .

أخيراً وبعد سلسلة من النجاحات والفشل ، وبعد ست سنوات من بداية المشروع عام 1939 ، وبعد إنفاق أكثر من (2) بليون دولار ، أصبح العلماء جاهزين لاختبار نتائج عملهم ، وقبل شروق شمس السادس عشر من يوليو عام 1945 وفي الساعة 5:30 غطى السماء ضياء برتقالي ساطع يشبه حبة المشروم (الفطر) كما في الشكل المجاور ، في مشهد لم يكن لأحد أن يراه من قبل ، سمع دوي الانفجار على مسافة (150) ميل بعيداً عن الموقع ، وتحولت الرمال في موقع الانفجار إلى زجاج أخضر من شدة الحرارة



وكان الرئيس الأمريكي روزفلت قد مات فجأة في الثاني عشر من أبريل 1945 ، وأصبح بعده هاري ترومان Harry Truman رئيساً ، وكان العديد من الأمريكيين يعتقدون أنه غير مؤهل لتولي هذا المنصب ، وبالفعل ارتكب هذا الرئيس أكبر مذبة في القرن العشرين .

فقد كانت الحرب شبه محسومة لصالح الحلفاء ، وأخذ اليابانيون يقاتلون بشكل انتحاري . وكان الاعتقاد السائد عند بعض الأمريكيين حينئذ أن الحرب لن تحسم إلا باجتياح اليابان ، ولكن هذه المغامرة ستكلف الأمريكيين الملايين من الأرواح فكان البديل أن تحسم باستخدام القنبلة النووية .

كان كثير من الأشخاص قد نصحوا الرئيس بعدم استخدام القنبلة النووية ضد اليابان ، وعلى رأسهم الجنرال دوايت أيزنهاور Dwight Eisenhower قائد قوات الحلفاء في أوروبا وذلك لسببين: الأول أن اليابان كانت على وشك الاستسلام ، ولا يوجد ضرورة لضربهم بشيء مروع مثل هذا ، والثاني الكره أن يستخدم الحلفاء هذا السلاح لأول مرة . وللأسف ، أعطى الرئيس ترومان قراره باسقاط القنبلة النووية فوق مدينة هيروشيما اليابانية في أغسطس 1945 .

وقد فكر الأمريكيون في إنذار اليابانيين أولاً ولكن خوفهم من نقل اليابانيين لأسرى الحرب من الحلفاء لموقع الانفجار ، وبالرغبة في إظهار قوة الأمريكيين وإلزام اليابانيين والسوفييت - القوة الجديدة على الساحة - حال دون ذلك .

في الساعة 2:45 من صباح يوم السادس من أغسطس 1945 ، أُلقيت القاذفة B-29 محملة بقنبلة نووية من قاعدة أمريكية في جزيرة تينيان Tinian Island في غرب المحيط الهادي . وبعد ست ساعات ونصف ، وفي الساعة 8:15 صباحاً بالتوقيت الياباني أُلقيت القنبلة من على ارتفاع 580 متر تقريباً فوق مركز مدينة هيروشيما ، وانفجرت بعد ذلك بدقة ، لتحصد أكبر مجزرة في تاريخ الإنسانية. ثم في التاسع من أغسطس أُلقيت القنبلة الثانية على مدينة ناجازاكي ، وقد قتلت القنابل ما يصل إلى 140000 شخص في هيروشيما، و80000 في ناجازاكي ، متأثرين بالجروح أو بسبب الصدمات والحروق الإشعاعية ، ليسجل شهر أغسطس نفسه رسمياً شهراً للمذابح عبر التاريخ.



5

محطات التوليد المائية

Hydropower Power Stations

حيث توجد المياه في أماكن بها فروق ارتفاعات كالبحيرات ومجاري الأنهار يمكن التفكير بتوليد الطاقة الكهربائية ، خاصة إذا كانت طبيعة الأرض التي تهطل فيها الأمطار أو تجري فيها الأنهار جبلية ومرتفعة. ففي هذه الحالات يمكن توليد الكهرباء من مساقط المياه.

أما إذا كانت مجاري الأنهار ذات انحدار خفيف فيقتضي عمل سدود في الأماكن المناسبة من مجرى النهر لتخزين المياه. وتتأش محطات التوليد عادة بالقرب من هذه السدود كما هو الحال في مجرى نهر النيل وعلى نهر الفرات في شمال سوريا.

هذا بالإضافة إلى الشلالات الطبيعية التي تستخدم مباشرة لتوليد الكهرباء كما هو حاصل في شلالات نياجرا بين كندا والولايات المتحدة . وبصورة عامة فإن أية كمية من المياه موجودة على ارتفاع معين تحتوي على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية . وإذا سلطت كمية المياه الساقطة على ترينة مائية دارت بسرعة كبيرة وتكونت على محور التربينه طاقة ميكانيكية . وإذا ربطت التربينه مع محور المولد الكهربى تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربية .

وفيما يلي صور جوية لأكبر سد مائى فى أمريكا (سد هوفر بولاية كولورادو) فى الأشكال من 1-5 إلى 3-5.



Figure 5-1 صور سد هوفر



Figure 5-2



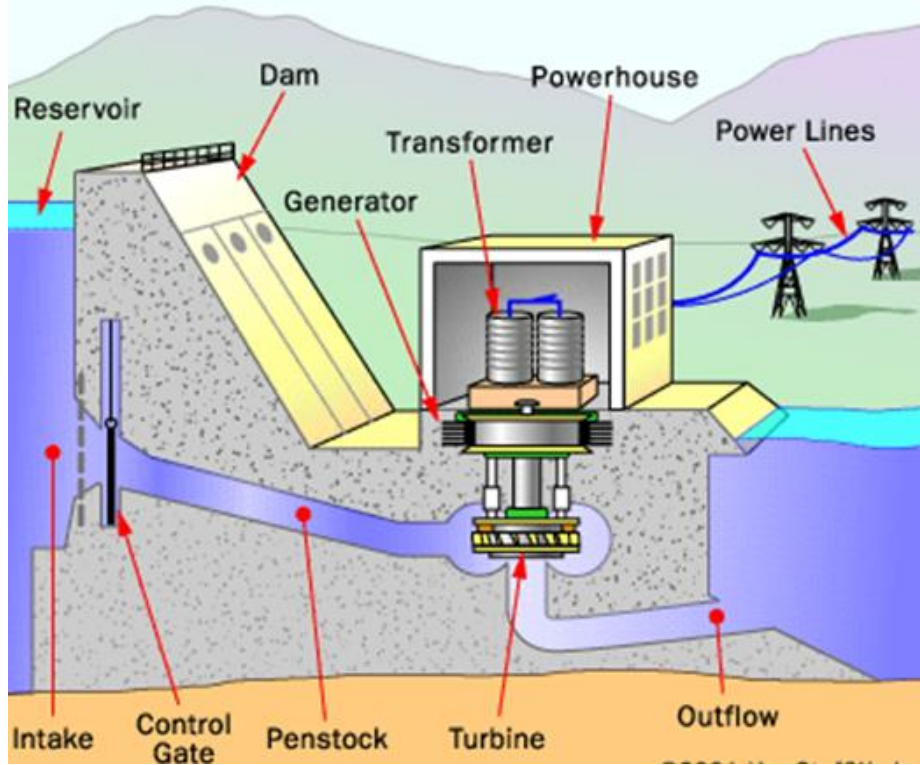
Figure 5-3

5.1 محطات التوليد المائية

تتميز هذه المحطات عموماً بأنها تنتج طاقة نظيفة ، وتستغرق عدة دقائق في الدخول على الشبكة ، ولها عمر افتراضي كبير ، وتكلفة التشغيل بسيطة ، ولها معدل الاستجابة على الشبكة عالي جداً (يمكن أن ترفع الإنتاج من 20MW إلى 150 MW مباشرة) لكن يعيبها أنها تحتاج إلى تكلفة إنشاء عالية ، وأن عملها مرتبط بكمية المياه المتوفرة أمام السد ، وبالتالي فالذي يتحكم في عملها مؤثرات خارجية مثل منسوب المياه المنصرف و احتياجات وزارة الري.

5.1.1 طريقة توليد الطاقة الكهرومائية

أي كمية ماء موجودة على ارتفاع معين تحتوى على طاقة كامنة في موقعها ، فإذا هبطت كمية المياه إلى ارتفاع أدنى تحولت طاقة الوضع إلى طاقة حركة وإذا سلطت على توربين مائي فإنه يدور بسرعة كبيرة ، وإذا ربطت التوربين مع محور المولد الكهربائي ، تولد على أطراف العضو الثابت من المولد طاقة كهربائية كما في الشكل رقم 4-5.



مخطط محطة توليد مائية Figure 5-4

تتألف محطة توليد الكهرباء المائية بصورة عامة من الأجزاء الرئيسية التالية.

1. السد Dam
2. الخزان Reservoir
3. المجرى المائل Penstock: وهو عبارة عن أنبوب كبير أو أكثر من أسفل السد إلى مدخل التوربين وتسيل المياه فيها بسرعة كبيرة يوجد فيها بوابات Control gates للتحكم في كمية المياه المارة.
4. التوربين Turbine: تكون التربينه والمولد عادة في مكان واحد مركبين على محور رأسي واحد كما في الشكل 5-5.
5. ويركب المولد Generator فوق التربينه . وعندما تفتح البوابة في أسفل الأنابيب المائلة تتدفق المياه بسرعة كبيرة في تجاويف مقعرة فتدور بسرعة وتدير معها العضو الدوار في المولد حيث تتولد الطاقة الكهربائية على أطراف هذا المولد .



تربينات مائية 5-5 Figure

6. أنبوب السحب outflow: بعد أن تعمل المياه المتدفقة في تدوير التربين فلابد من سحبها للخارج

بسرعة ويسر حتى لا تعوق الدوران.

7. المعدات و الآلات المساعدة: مثل المضخات و المفاتيح ومعدات تنظيم سرعة الدوران.

5.1.2 نظرية العمل

يبنى سد على مجرى مائي ، فيحجز الماء خلفه لتتكون بحيرة اصطناعية بسعة مائية كبيرة. وتعتمد كمية الطاقة الكهربائية المولدة من المحطة على عنصرين أساسيين هما:

- ارتفاع المياه خلف المحطة (فرق المنسوب بين سطح المياه خلف السد ومنسوب التوربينات).
- معدل تدفق كمية المياه خلال التوربينات .

ويمكن حساب القدرة الكهربائية كالآتي :

$$\text{القدرة (وات)} = (\text{الارتفاع (م)}) \times (\text{كمية التدفق (م}^3/\text{ث)}) \times (\text{عجلة الجاذبية (9.81 م/ث}^2) \times (\text{كثافة المياه (1000 كجم/م}^3) \times (\text{كفاءة المحطة})$$

وبالنسبة إلى الكفاءة فهي تحسب بالتقريب بنحو 85% بالنسبة لمحطات القوى المائية .

وتختلف قدرة كل سد مائي في توليد الكهرباء بحسب ارتفاع منسوب الماء فيه وكمية الماء التي تتدفق في التوربين أو التوربينات وكفاءة التوربين والمولد الكهربائي ، كما نقول لنا معادلة القدرة. أكبر محطة لتوليد الكهرباء من سد مائي هي 18.000 جيجاوات وتوجد في الصين الشعبية.

Example 2.8. Water for a hydro-electric station is obtained from a reservoir with a head of 100 metres. Calculate the electrical energy generated per hour per cubic metre of water if the hydraulic efficiency be 0.86 and electrical efficiency 0.92.

Solution.

$$\begin{aligned}\text{Water head, } H &= 100 \text{ m ; discharge, } Q = 1 \text{ m}^3/\text{sec ; } \eta_{\text{overall}} = 0.86 \times 0.92 = 0.79 \\ \text{Wt. of water available/sec, } W &= Q \times 1000 \times 9.81 = 9810 \text{ N} \\ \text{Power produced} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} = 9810 \times 100 \times 0.79 \text{ watts} \\ &= 775 \times 10^3 \text{ watts} = 775 \text{ kW} \\ \therefore \text{ Energy generated/hour} &= 775 \times 1 = \mathbf{775 \text{ kWh}}\end{aligned}$$

Example 2.10. A hydro-electric power station has a reservoir of area 2.4 square kilometres and capacity $5 \times 10^6 \text{ m}^3$. The effective head of water is 100 metres. The penstock, turbine and generation efficiencies are respectively 95%, 90% and 85%.

- Calculate the total electrical energy that can be generated from the power station.
- If a load of 15,000 kW has been supplied for 3 hours, find the fall in reservoir level.

Solution.

$$\begin{aligned}(i) \text{ Wt. of water available, } W &= \text{Volume of reservoir} \times \text{wt. of } 1 \text{ m}^3 \text{ of water} \\ &= (5 \times 10^6) \times (1000) \text{ kg} = 5 \times 10^9 \times 9.81 \text{ N} \\ \text{Overall efficiency, } \eta_{\text{overall}} &= 0.95 \times 0.9 \times 0.85 = 0.726 \\ \text{Electrical energy that can be generated} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} = (5 \times 10^9 \times 9.81) \times (100) \times (0.726) \text{ watt-sec.} \\ &= \frac{(5 \times 10^9 \times 9.81) \times (100) \times (0.726)}{1000 \times 3600} \text{ kWh} = \mathbf{9,89,175 \text{ kWh}}\end{aligned}$$

- Let x metres be the fall in reservoir level in 3 hours.

$$\begin{aligned}\text{Average discharge/sec} &= \frac{\text{Area of reservoir} \times x}{3 \times 3600} = \frac{2.4 \times 10^6 \times x}{3 \times 3600} = 222.2x \text{ m}^3 \\ \text{Wt. of water available/sec, } W &= 222.2x \times 1000 \times 9.81 = 21.8x \times 10^5 \text{ N} \\ \text{Average power produced} &= W \times H \times \eta_{\text{overall}} \\ &= (21.8x \times 10^5) \times (100) \times (0.726) \text{ watts} \\ &= 15.84x \times 10^7 \text{ watts} = 15.84x \times 10^4 \text{ kW} \\ \text{But kW produced} &= 15,000 \text{ (given)} \\ \therefore 15.84x \times 10^4 &= 15,000 \\ \text{or } x &= \frac{15,000}{15.84 \times 10^4} = 0.0947 \text{ m} = \mathbf{9.47 \text{ cm}}\end{aligned}$$

5.1.3 ما هو الارتفاع الحرج ؟

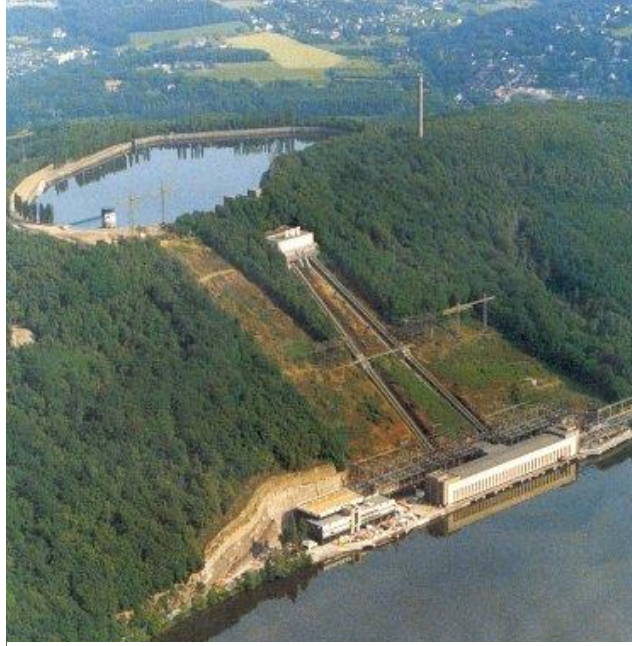
الارتفاع الحرج هو أقصى ارتفاع لسطح المياه في خزان السد بعده يتوقف تشغيل المحطة ، وذلك لحدوث ظاهرة التكيف (Cavitation) . و سبب حدوث ظاهرة التكيف هو أنه عند زيادة الضغط المائي في الخزان تزيد سرعة المياه داخل التوربينات ويقل ضغط المياه (قاعدة برنولي) ، وعند هذه النقطة تتحول المياه من الحالة السائلة إلى

الحالة الغازية (غليان السائل) مكونة فقاعات غازية ، ومع زيادة سرعة التوربينات تتفجر هذه الفقاعات محدثة تآكل في ريش التوربينات ، لذلك لابد من إيقاف التشغيل عند هذه السرعات العالية .

5.1.4 محطات الضخ والتخزين

نشير هنا إلى أن أفضل طريقة حالياً تستعمل في تخزين الطاقة الكهربائية بكميات هائلة ، هي طريقة ضخ المياه إلى خزان علوي محفور بصورة طبيعية فوق جبل كما في الشكل 5-6 ثم استرجاع الطاقة بعد ذلك من خلال محطات توليد مائية ، فعند توفر فائض من الإنتاج يتم استعماله لرفع المياه بواسطة المضخات الكهربائية للتخزين أعلى الجبل (تخزين في صورة طاقة وضع) ، ثم استعمال هذه المياه المخزنة لتولد الطاقة عند ذروة الطلب ، حيث تتدفق من أعلى الجبل لتصطدم بتربينات هيدروليكية لإنتاج الطاقة الكهربائية .

وهذه الدورة يمكن أن تكون يومية أو اسبوعية أو فصلية. وتسمى بتقنية الضخ والتخزين Pumping Storage وحاليا تتم دراسة تنفيذ مشروع مشابه في جبل عتاقة بمصر



محطة ضخ وتخزين بألمانيا Figure 5-6

6

محطات التوليد بالطاقة المتجددة

مع تقدم تقنيات التصنيع في مجال محطات التوليد بالطاقة الجديدة أصبحت أسعار إنشاء هذه المحطات متقاربة مع أسعار المحطات التقليدية ، حيث وصل السعر في 2015 إلى 4 سنت لكل ك وات ساعة من الخلايا الشمسية (مشروع شركة اكوابور في محطة شمسية بدبي) ، وبلغ نفس السعر في محطة رياح بمصر في نفس العام 2015 (شركة EDF المنفذة لمزرعة رياح قدرة 250 ميغا وات بمصر).

هذا الانخفاض يصاحبه عدم الحاجة لمد شبكات كهربية لأن التوليد يصبح محلي ، ومع الأخذ في الاعتبار حجم التقليل من الانبعاثات الكربونية ، وهذا ما يؤكد أهمية هذا النوع من الطاقات الذي ندرسه في هذا الفصل. وسيتم التركيز على خمسة أنواع كمثال فقط ، وهي:

- محطات الخلايا الكهروضوئية
- المحطات الشمسية الحرارية
- محطات الـ Geothermal
- محطات التوليد من المد والجزر
- محطات الرياح

والشكل 6-1 يبين حجم التطور الهائل في إنتاج الطاقة الجديدة في بعض الدول الكبرى

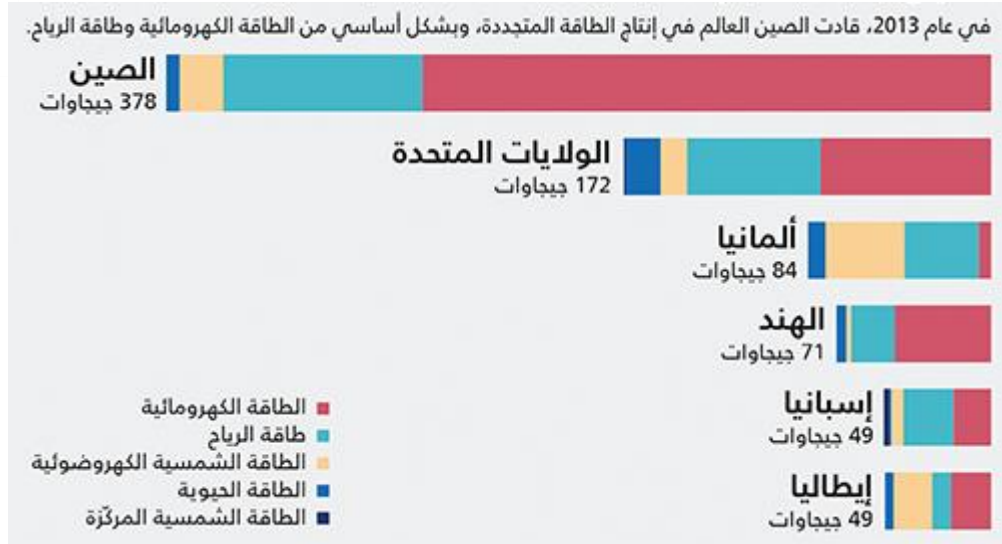


Figure 6-1

المثال الأول من محطات الطاقة الجديدة

محطات الخلايا الكهروضوئية

الشمس هي مفاعل نووي عملاق يقوم على مبدأ الاندماج النووي وليس الانشطار النووي ، فالشمس تتكون أساسا من الهيدروجين والهيليوم والكربون ، ويحدث داخلها اندماج بين أنوية اثنين من ذرات الهيدروجين لتشكيل نواة الهيليوم وينتج عن هذه العملية طاقة هائلة باستمرار .

والطاقة المنبعثة من الشمس لا تصل إلى الأرض بالتساوي بل تختلف حسب الوقت من اليوم ، وفقا للإمالة الموسمية من الكرة الأرضية بالنسبة للشمس ، وفقا لتوزيع المناطق المناخية على سطح الأرض ، وما إلى ذلك . و التقديرات تشير إلى أن كل متر مربع على الأرض يتلقى من الشمس ما بين 1000 إلى 1300 وات . وحيث أن معظم الخلايا الشمسية في السوق لها كفاءة لا تتعدى في المتوسط 10% فهذا يعني أن كل متر مربع من الخلايا يمكن أن يولد تقريبا 100 وات (تزيد أو تنقص حسب كفاءة الخلايا المستخدمة).

6.1 قواعد أساسية في الطاقة الشمسية

أشير في المقدمة التالية إلى بعض المعلومات عن الطاقة الشمسية التي يحتاجها المتعاملون معها والتي قد تبدو للبعض غريبة في بعض جزئياتها. وسأعرض ذلك من خلال بعض الأسئلة:

6.1.1 لماذا يكون الصيف أعلى في درجة الحرارة؟

البعض يظن أن ذلك بسبب أن الشمس تكون أقرب للأرض في هذا الفصل ولذا تكون الحرارة أعلى. والحقيقة أن الإجابة ليست فقط خطأ بل معكوسة. بمعنى أن الصحيح أن الشمس تكون في الصيف أبعد عن الأرض منها الشتاء . إذن فلماذا تكون الحرارة أعلى؟

لمعرفة السبب لابد من فهم طريقة دوران الأرض حول نفسها (كل 24 ساعة مسببة ظاهرة الليل والنهار) ، وطريقة دورانها حول الشمس (كل 365 يوم وربع مسببة ظاهرة الفصول الأربعة). فالأرض أولا تدور حول نفسها ولكن محور دورانها يكون مائلا بزاوية 23 درجة تقريبا كما في الشكل 6-2 . كما أن دورة الأرض حول الشمس تكون في مسار إهليجي وليس دائريا . بمعنى أنها لا تدور في دائرة لها نصف قطر ثابت ، بل تدور في مدار له قطر Diameter أطول من القطر الآخر .

فلو أخذنا نصف الكرة الشمالي (الذي تقع فيه كل الدول العربية) ستجد أن الصيف يحدث كما في الشكل 6-2 حين يكون نصف الكرة الشمالي مواجهها للأرض ، ولكن في نفس الوقت حين تكون الكرة الأرضية تقع على القطر الأكبر من مسار الدوران أي عندما تكون أبعد عن الشمس. فلماذا ترتفع الحرارة ؟ هل فقط لأنها تواجه الشمس ؟ هذا جزء من الإجابة ، وباقي الإجابة لأنها تواجه الشمس لمدة طويلة من اليوم ، فزيادة البعد عن الشمس يجعل منطقة التغطية أطول زمنا كما لو أخذت ورقة وقربتها لمصباح ستجد أن ضوء المصباح يغطي مساحة معينة من الورقة ، لكن لو أبعدت الورقة ستجد أن المصباح أصبح يغطي مساحة أكبر. وهذا هو السر

فى حرارة الصيف ، ليس لأن الأرض أقرب للشمس بل العكس لأن الأرض أبعد عن الشمس (وبالتبع تواجه الشمس) ولذا يكون نهار الصيف أطول وكمية الحرارة التى تصل للأرض أكبر .

لاحظ فى الشكل أن الشتاء يقع فى نصف الكرة الشمالى أيضا حين تكون الأرض على القطر الأكبر لكن الفرق هنا أن الشمس لا تواجه نصف الكرة الشمالى ، ولذا يكون ليل الشتاء طويلا وكمية الحرارة أقل.

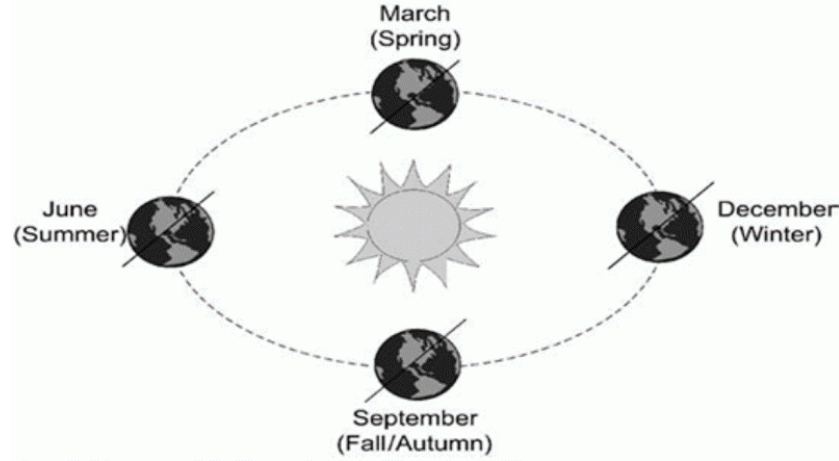


Figure 6-2 دوران الأرض حول محورها المائل ، ودورانها فى مسار إهليجى حول الشمس

6.1.2 إلى أى جهة توجه الألواح الشمسية؟

أهم ملاحظة يجب أن تستنبطها من الشكل السابق هو أنه أيا كان مكانك فى نصف الكرة الشمالى فإن الشمس فى أي فصل من فصول السنة تكون دائما مائلة ناحية الجنوب ، لذا فإن جميع الألواح الشمسية فى البلاد التى تقع فى نصف الكرة الشمالى يجب أن توجه جهة الجنوب . ويبقى السؤال التالى:

6.1.3 كيف أختار زاوية اميل جهة الجنوب؟

الحقيقة أنه لو كنت تعيش على خط الاستواء نفسه فإن زاوية الميل المثلى هى صفر ، بمعنى أن الألواح توضع أفقية ، ولو كنت تعيش فى أقصى طرفى الكرة الشمالى أو الجنوبى فإن أنسب زاوية هى 90 درجة. أما إذا كنت كما فى الدول العربية فإن أنسب زاوية للميل (جهة الجنوب كما ذكرنا) تتوقف على موقعك الجغرافى وتحديدًا على قيمة خط العرض الذى تقع عليه.

وهذا السؤال (زاوية الميل) أصعب من السؤال السابق (الجهة) ، لأن المسار الإهليجى لدوران الأرض حول الشمس يتغير زاوية ميله هو الآخر حسب الفصل كما فى الشكل 6-3.

6.2 الاستفادة من الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء

يتم الاستفادة من الطاقة الشمسية في أغراض توليد الطاقة الكهربائية عبر طريقتين أو نظامين:

- 1- النظام الكهروضوئي: وذلك عبر استخدام الخلايا الكهروضوئية PV Cells تحويل الطاقة الضوئية الشمسية بشكل مباشر إلى كهرباء من خلال تعريض هذه الخلايا للطاقة الضوئية . ويمكن بهذه الطريقة أن نحصل على ما يقرب من 10-15% من الطاقة الساقطة على المتر المربع في صورة كهرباء مباشرة كما في الأمثلة الموجودة في الجزء التالي.
- 2- كما يمكن استخدام نظام المركبات الشمسية وهي أنظمة تستخدم العدسات والمرايا لتركيز الأشعة الشمسية المتناثرة الحاملة للطاقة الحرارية نحو بقعة معينة ، ووفقاً لآليات متعددة و متنوعة يتم تحويل هذه الحرارة المركزة إلى طاقة كهربائية وبالتالي ففي هذا النظام يتم الحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من الطاقة الشمسية. ونعرض هذا في المثال الثاني من محطات الطاقة الجديدة.

6.2.1 أمثلة للمحطات الكهربائية الكهروضوئية

نستعرض هنا أكبر محطات الطاقة الشمسية في العالم التي تستخدم الألواح الكهروضوئية بناءً على القدرة المنتجة من كل محطة:

1- محطة ولاية أريزونا

تقع محطة (Agua Caliente Solar Project) (شكل 6-5) في مدينة يوما في ولاية أريزونا في الولايات المتحدة الأمريكية وهي إلى حد الآن أكبر محطة طاقة شمسية تعمل بتقنية الخلايا الكهروضوئية (PV Photovoltaic solar cell) وتمتد على مساحة تصل إلى 9.7 كم مربع ، و القدرة المركبة إلى الآن هي 400 ميجا وات ، وقد تم تركيب هذه المحطة من قبل شركة (First Solar) حيث تتألف هذه المحطة من 5 مليون لوح من الخلايا الشمسية الرقيقة (thin film) بقدرة تقريبية بين 75-77 وات لكل لوح .



Figure 6-5 Agua Caliente Solar Project

2- محطة شارنكا الهندية

تقع محطة (Charanka Solar Park) (شكل 6-6) في مدينة شارنكا في الهند ، وتمتد على مساحة تصل إلى 19.8 كم مربع ، تعمل أيضا بتقنية الخلايا الكهروضوئية و القدرة المركبة فيه في نهاية عام 2014 وصلت إلى 300 ميغا وات وبتكلفة 280 مليون دولار .



Figure 6-6 Charanka Solar Park

3- محطة في الصين

تقع محطة Huanghe Golmud Solar Park (شكل 6-7) في صحراء جولمود في مقاطعة (Qinghai) في الصين ، وتمتد على مساحة 5.64 كم مربع. كانت أكبر محطة خلايا شمسية في العالم (PV Photovoltaic solar cell) عندما تم تركيبها في 2011 وتبلغ قدرتها 200 ميغا وات .



Figure 6-7 Huanghe Golmud Solar Park

6.2.2 ارتباط منظومة التوليد الشمسية بالشبكة الموحدة

تنوع الأنظمة الكهروضوئية تبعاً للنظام الكهربائي بمعنى ربطها أو عدم ربطها بالشبكة الكهربائية ، حيث يوجد نظامان رئيسيان:

1 - نظام منفرد غير مرتبط مع الشبكة stand alone or off-Grid system (شكل 6-8)

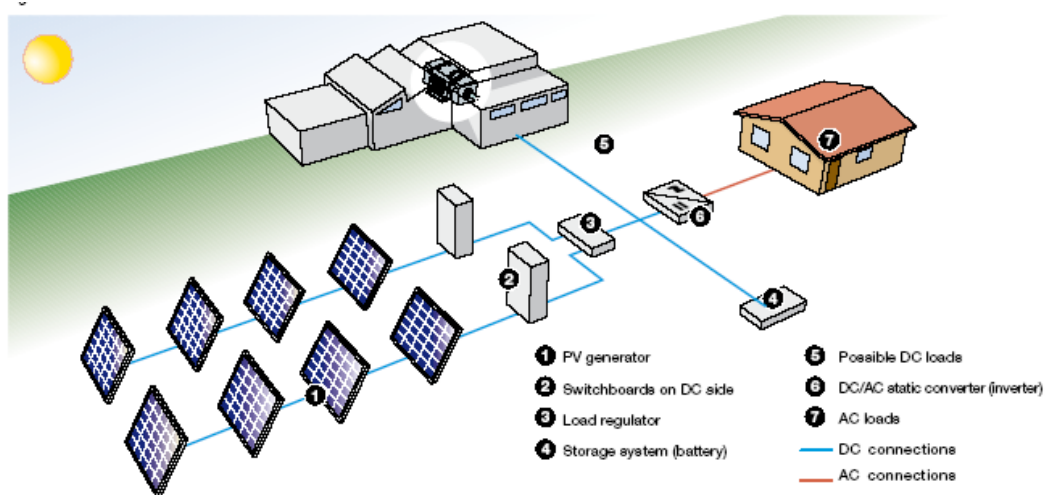


Figure 6-8

2- نظام مرتبط مع الشبكة الكهربائية Grid- connected system (شكل 6-9)

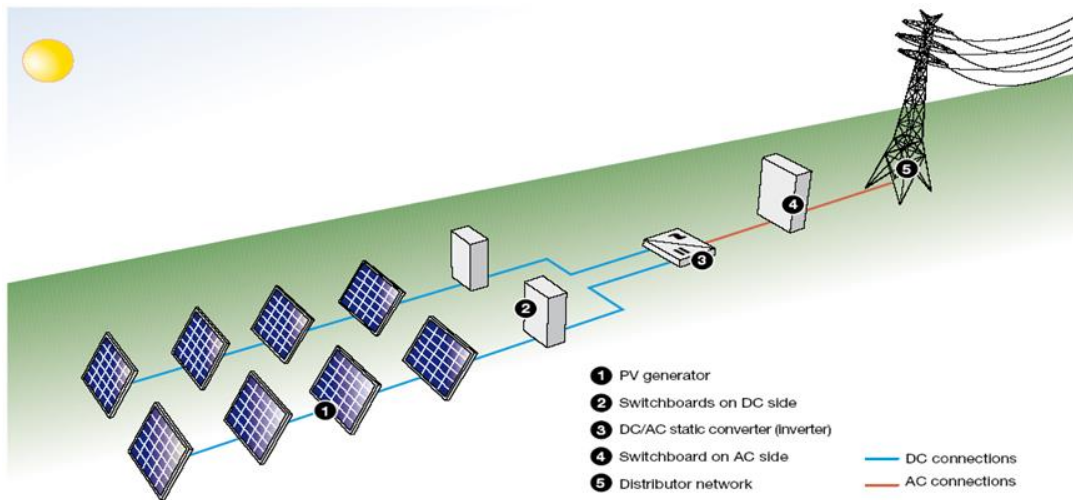


Figure 6-9

وأيضاً هذه الأنظمة نفسها من الممكن أن تحتوي على بطاريات لتخزين الطاقة وقت الحاجة إليها أثناء الليل ، أو قد لا تحتوي ، وذلك يعتمد على الغرض من إقامة النظام الكهروضوئي (تغذية منزل بالكهرباء ، توليد الكهرباء لتغذية مضخة المياه إلخ) ووفقاً لدراسة اقتصادية وإلى اعتبارات كثيرة. (وتفاصيل هذه الخلايا خارج نطاق هذا الكتاب).

وقد يكون هناك نظام للاتباع الشمسي Sun Tracer من أجل الحصول على Max Power وقد تكون الخلايا مثبتة على اتجاه واحد كما في الشكل 6-10.



Figure 6-10 خلايا غير مزودة بمتتبع شمسي

المثال الثاني من محطات الطاقة الجديدة

المحطات الشمسية الحرارية

يمكن توليد الكهرباء باستغلال الحرارة المباشرة لأشعة الشمس ، باتباع تقنية الكهرباء الحرارية الشمسية solar thermal electricity. وهذه المحطات البخارية تقوم بتركيز أشعة الشمس فوق مساحات شاسعة بواسطة مرايا مقعرة أو عدسات لامة هائلة ، وتركز الأشعة الشمسية لنقع فوق مستقبلات خاصة بها سائل كالزيت يمتص الحرارة ويدور في الأنابيب لتسخين الماء وتحويله لبخار ، وهذا البخار يدير توربينات توليد الكهرباء. ويمكن الاستعانة في الأيام الغائمة أو بالليل بالمرحوقات التقليدية كالفحم والنفط والغاز الطبيعي. ويتم بهذه الطريقة تقليل استخدام الوقود الملوث للبيئة.

6.3 الأنواع المختلفة من محطات الشمسية الحرارية

ومحطات التوليد هذه تعتمد واحدة من منظومات ثلاث مشهورة:

6.3.1 منظومة القطع المكافئ

هذا النوع يظهر في الشكل 6-11 ، وفيه يكون سطح المركزات الشمسية العاكس على شكل قطع مكافئ ويتم تركيز الإشعاع المباشر على مستقبل حراري طولي مركب في بؤر المركزات لتسخين الزيت (ناقل الحرارة). والصورة لمحطة في أسبانيا وتعتبر أول محطة في أوروبا تستخدم تقنية المركزات الشمسية parabolic trough solar thermal حيث تم بناءها في



thermal حيث تم بناءها في 2009 وبقدرة مركبة تقدر ب 150 ميجاوات وتمتلك هذه المحطة خزان ملح مذاب ، يتم فيه تخزين الطاقة الحرارية الناتجة عن الشمس خلال النهار لتبقى المحطة عاملة حتى في ساعات عدم وجود الشمس ، وقد بلغ إنتاج هذه المحطة 540 ميجا وات ساعة سنويا.

Figure 6-11 parabolic trough solar thermal



محطة الكريما Figure 6-12

وأول محطة في الشرق الأوسط
من هذا النوع أنشئت في مصر
(الكريما - جيزة) (شكل 6-12)
(باستخدام تكنولوجيا القطع
المكافئ وتصل المساحة الإجمالية
للمركبات الشمسية إلى حوالي
220 ألف متر مربع ويتم توصيلها
على التوالي والتوازي للحصول
على درجة الحرارة المطلوبة ، ثم
ينتقل الزيت الحراري المغلي من
هذه المركبات إلى مولد البخار
التقليدي بالمحطة لإنتاج بخار

مشبع بضغط حوالي 20 جوى ودرجة حرارة 400 درجة ، ثم يتم نقله كما في المحطات البخارية العادية إلى
المحركات لينكامل مع البخار الذى أنتج فى نفس المحطة ولكن بالوقود العادى (الغاز الطبيعى) ، وبالتالي
تنخفض نسبة الوقود العادى فى النهاية والأهم من ذلك انخفاض كمية الغازات المنبعثة من احتراقه.

ويوجد أيضا في أبو ظبي محطة شمس 1 بالقرب من مدينة زايد وقد تم تشغيلها فى 2013 وهي تتألف من
258000 ، مرآة على مساحة 2.5 كيلومتر مربع بقدرة إنتاجية تبلغ 100 ميجاوات.

6.3.2 منظومة البرج المركزى

وفيها تستخدم أعداد هائلة من المرايا المسطحة الموزعة حول البرج المركزى (شكل 6-13) بحيث تنعكس
الأشعة الساقطة على المرايا إلى البرج الذى يحتوى على الزيت (ناقل الحرارة).



Figure 6-13 البرج المركزى

وبالطبع يمكن إنتاج الكهرباء من هذه المحطات في الليل و بكفاءة عالية ، و ذلك بتخزين الفائض الحراري الكبير من الطاقة الشمسية في مادة ملحية تسمى الملح المذاب (Molten Salt) الذي يمكنه تخزين الطاقة الحرارية في خزانات و من ثم يتم إعادة استخدامها في الليل في عملية إنتاج البخار عن طريق عملية التبادل الحراري. كما يمكن إضافة الغاز أو مشتقات النفط كوقود ثانوي في حالة هبوب العواصف و الغبار و الأمطار و تسمى هذه العملية ب (Hybrid System) أى النظام المزدوج للتوليد.

6.3.3 منظومة القطع الدائري

وفيها يتم تركيز الإشعاع الشمسي على المبادلات الحرارية في بؤر المركزات الشمسية شكل 6-14. والمجمع Collector هو جهاز يستخدم لتحويل الطاقة الموجودة في أشعة الشمس أو الإشعاع الشمسي إلى صورة أكثر قابلية للاستخدام والتخزين .



القطع الدائرى 6-14 Figure

المثال الثالث من محطات الطاقة الجديدة

توليد الطاقة الكهربائية من حرارة باطن الأرض

تتأثر تربة الأرض بتغيير درجة حرارة الجو اليومية على عمق 30-70 سم ، وتتأثر بتغيير حرارة الفصول على عمق 10-20 متر ، لكن يزول تأثير حرارة الشمس ابتداءً من عمق أبعد من 15-20 متر ، ويكون التأثير الوحيد الباقي هو تأثير حرارة باطن الأرض Magma ، وبسبب حرارة مركز الأرض الهائلة فإن درجة الحرارة في باطن الأرض تزداد 3 درجات مئوية لكل 100 متر عمقاً ، فإذا كان متوسط درجة حرارة السطح 20 درجة مئوية فإننا يمكن أن نبلغ درجة غليان الماء (100 درجة مئوية) عند عمق 2.7 كم تقريباً. ولو افترضنا إطراد الزيادة في الحرارة باطراد العمق لبلغنا عند عمق 50 كم عن سطح الأرض درجة انصهار الصخر وهي تقع ما بين 1200 - 1800 درجة مئوية. ولكن بالطبع هناك صعوبات فنية للوصول إلى أعماق كبيرة في باطن الأرض ، وأقصى عمق وصل إليه الإنسان هو تقريباً 8 كم.

6.3.1 من أين جاءت حرارة باطن الأرض؟

وفي تفسير سبب هذه الطاقة الكامنة يقول العلماء أن الأرض كانت جزءاً من الشمس ، فانفصلت عنها وبردت قشرتها الأرضية خلال ملايين السنين ، ولكن بقي القلب في حالة ذوبان وانصهار. فالأرض بشكلها الأول كانت عبارة عن كتلة نارية مشعة عملاقة ، ونتيجة لانخفاض درجة الحرارة بدأت تتشكل القشرة الأرضية التي قامت بعزل حرارة باطن الأرض مما أدى إلى حصر كل المواد المنصهرة في باطن الأرض. وبسبب شدة الضغط المتولد نتيجة العزل وتكون القشرة بدأت عمليات الاندماج النووي مما ضاعف درجات الحرارة إلى حوالي 6700 درجة مئوية في مركز الأرض.

وبالتأكيد فنحن قد رأينا كيف تتحدر المياه نزولاً في الشلالات، لكن السؤال الأصعب هو : ما الذي يدفع بها صعوداً لأعلى من باطن الأرض؟

إن الينابيع الحارة التي نراها في بعض الأماكن هي أعمدة من البخار والمياه الساخنة تتفجر كالبراكين المائية. فالصخور البركانية في باطن الأرض هي التي ترفع حرارة المياه المتجمعة تحت سطحها ، ويتأثر الضغط القوي ، تغلي المياه ، فتتمدد ويدفع مزيج البخار والماء نحو سطح الأرض، فنراها على شكل أعمدة ترتفع إلى 5000 متر أحياناً! . وقد تصل في بعض الأماكن إلى مرحلة Flashover وتخرج في هيئة بخار مباشرة. والشكل 6-15 يظهر هذه الحالات حسب بعدها عن مركز الأرض وذلك في مقطع رأسى من الكرة الأرضية.

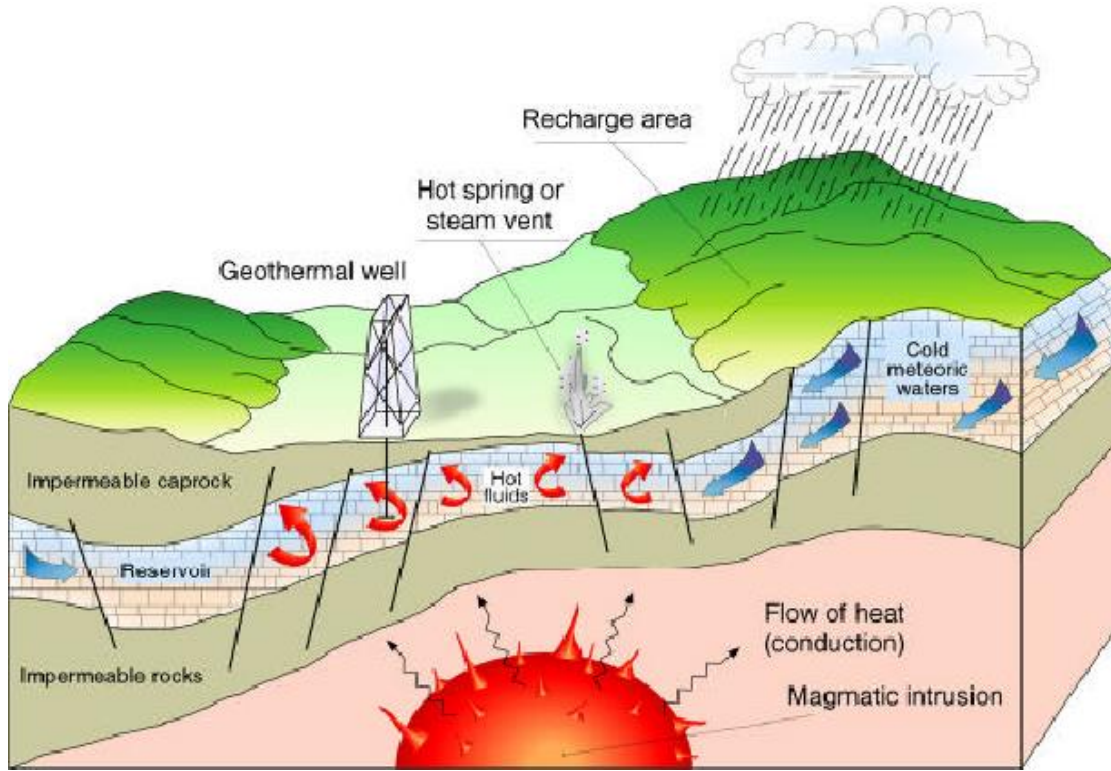


Figure 6-15 حرارة باطن الأرض

والحرارة الكامنة في باطن الأرض تسبب ارتفاع درجة حرارة الماء الموجود حول الصخور الأرضية إلى درجة الغليان في بعض الأماكن وإلى درجة التبخر في أماكن أخرى (شكل 6-15). وبالتالي تستخدم هذه المياه الساخنة مباشرة كما في آيسلندا ، أو يستخدم البخار في توليد الكهرباء كما في إيطاليا أو يستخدم الماء الساخن كمرحلة أولى ضمن محطة توليد الكهرباء لتوفير الطاقة المستخدمة من الوقود الملوث للبيئة .

6.3.2 استخلاص الحرارة

يتم الوصول لعمق الأرض بمد أنبوب دخول لدفع الماء لأسفل يسمى أنبوب الحقن Injection Well ، وأنبوب خروج لاستقبال الماء المغلي المندفع لأعلى يسمى أنبوب الإنتاج Production Well ، حيث يتم ضخ مياه عادية عبر الأنبوب الأول إلى أسفل ، وعندما تصل المياه إلى الأسفل ونتيجة احتكاكها مع الحرارة العالية ، يتبخر الماء بشدة (حيث تبلغ الحرارة 1000 درجة) ليخرج البخار من الأنبوب الآخر مشكلاً ضغطاً هائلاً ، فيصعد البخار بقوة نحو الأعلى ، وفي نهاية الطرف الذي يصعد منه البخار ، توضع توربينات ضخمة من شأنها توليد الطاقة من ذلك البخار (شكل 6-16)

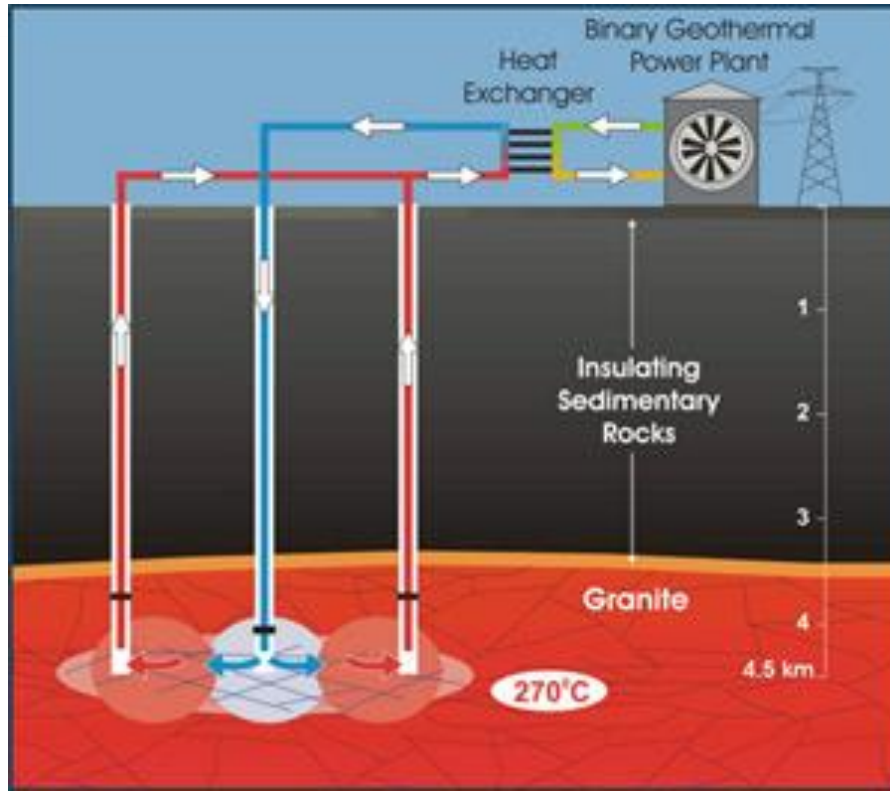
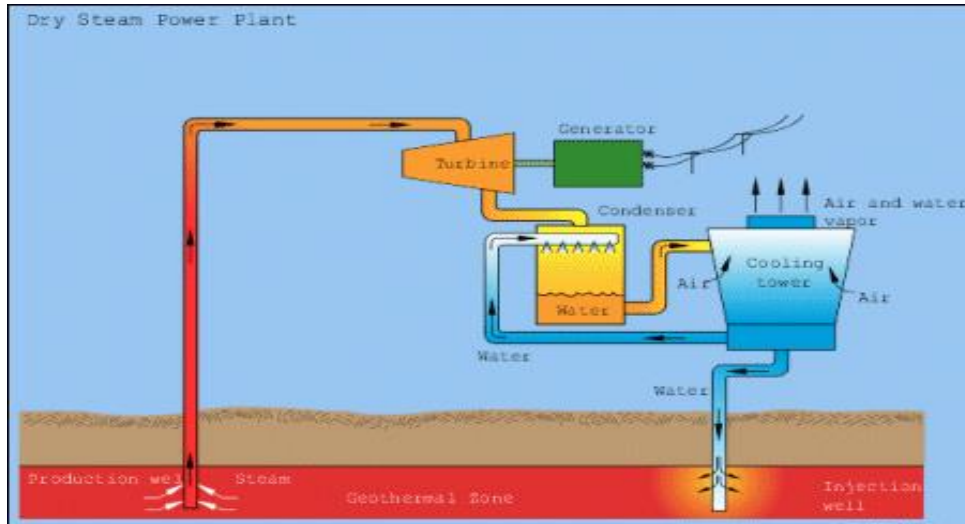


Figure 6-16 استخلاص الحرارة من باطن الأرض

6.4 أنواع محطات الـ GEOTHERMAL

6.4.1 محطات البخار الجاف:

هذه الطريقة هي أقدم الطرق وأكثرها انتشارا ، وهي نفس الطريقة التي استخدمت في إيطاليا منذ سنة 1904م ، حيث تستخدم هذه المحطات الماء الموجود بشكل طبيعي في الطبقات الأرضية العميقة والموجود تحت تأثير ضغط وحرارة عاليين ، فيتم استخراجه بواسطة حفر آبار عميقة فيخرج على شكل بخار ماء بسبب حرارته العالية وبسبب فرق الضغط يسير هذا البخار في أنابيب ثم يصطدم بتوربينات تدير المولدات الكهربائية التي تنتج الطاقة الكهربائية. يضخ الماء المكتشف إلى الأرض عبر بئر آخر يسمى بئر الحقن Injection Well (شكل 6-17).

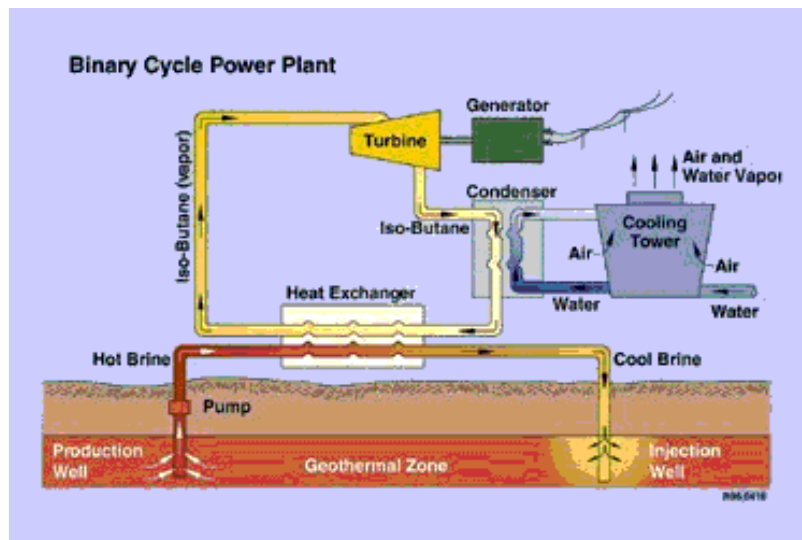


محطة بخار جاف Figure 6-17

6.4.2 محطات الدائرة المزدوجة:

تستخدم هذه المحطات السوائل الموجودة تحت الأرض ذات درجة غليان مرتفعة (حوالي 200 مئوية) يتم ضخها إلى الأعلى حيث تقوم بتسخين الماء ذي درجة غليان عادية (100 مئوية) في أنبوب آخر يمر بمحاذاة الأنبوب الساخن (مبادل حراري). يتبخر الماء الذي تم تسخينه بسبب درجة الحرارة المرتفعة للسائل في الأنبوب الآخر . يحرك البخار توربين المولد الكهربائي ويتكثف فيعود مجددا إلى محاذاة الأنبوب الساخن ، ويتحرك بهذه الطريقة في دوران مستمر. يُعاد ضخ الماء المستخرج مجددا إلى الأرض عبر بئر الحقن (شكل 6-18)

لاحظ أن الأماكن المرشحة لعمل آبار مثل هذه هي في الغالب تقع في أماكن التثقيب عن البترول .



محطة دائرة مزدوجة Figure 6-18

المثال الرابع من محطات الطاقة الجديدة

محطات التوليد من المد والجزر

Tidal Power Stations

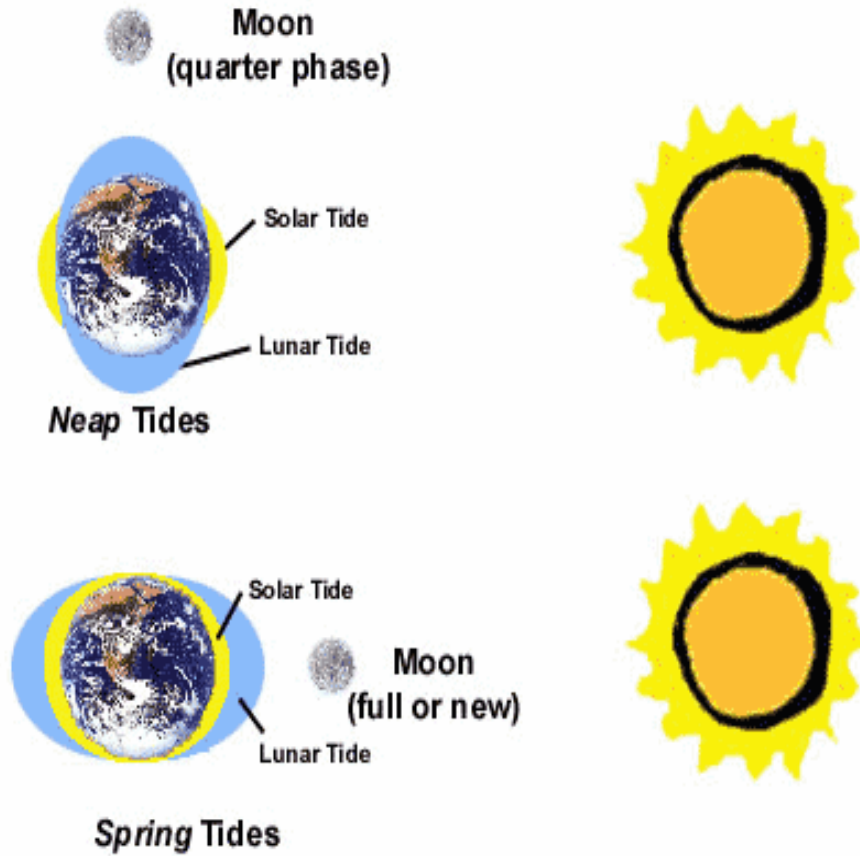
المد والجزر من الظواهر الطبيعية المعروفة عند سكان سواحل البحار . فهم يرون مياه البحر ترتفع في بعض ساعات اليوم وتنخفض في الأخرى. وقد لا يعلمون أن هذا الارتفاع ناتج عن جاذبية القمر عندما يكون قريبا من هذه السواحل ، وأن ذلك الانخفاض يحدث عندما يكون القمر بعيدا عن هذه السواحل ، أي عندما يغيب القمر ، علما أن القمر يدور حول الأرض في مدار أهليجي أي بيضاوي الشكل دورة كل شهر هجري ، وأن الأرض تدور حول نفسها كل أربع وعشرين ساعة . فإذا ركزنا الانتباه على مكان معين ، وكان القمر ينيره في الليل ، فهذا معناه أن القمر قريب من ذلك المكان وأن جاذبيته قوية . لذا ترتفع مياه البحر . وبعد مضي أثني عشرة ساعة من ذلك الوقت ، يكون القمر بالجزء المقابل قطريا ، أي بعيدا عن المكان ذاته بعدا زائدا بطول قطر الكرة الأرضية فيصبح اتجاه جاذبية القمر معاكسة وبالتالي ينخفض مستوى مياه البحر .

وأكثر بلاد العالم شعورا بالمد والجزر هو الطرف الشمالى الغربى من فرنسا حيث يعمل مد وجزر المحيط الأطلسي على سواحل شبه جزيرة برنتانيا إلى ثلاثين مترا ، وقد أنشئت هناك محطة لتوليد الطاقة الكهربائية بقدرة 400 ميجاوات . حيث توضع توربينات خاصة في مجرى المد فتديرها المياه المتجه للخزان في نصف الشهر الأول ثم تعود المياه الهابطة من الخزان وتديرها مرة أخرى. في نصف الشهر الثانى (انظر الصورة في نهاية هذا الجزء).

6.5 أساسيات عملية المد والجزر TIDAL POWER STATIONS

ينجم المد والجزر عن الجاذبية التي يمارسها القمر على الأرض (شكل 6-19) ، و قوة الجاذبية هذه تؤدي إلى اندفاع مياه المحيطات نحو القمر وبالتالي ارتفاع المياه بدرجة أكبر على جهة الأرض المواجهة للقمر ، و يحدث أيضا على الجانب الآخر من الأرض بنفس الطريقة ، و بين منطقتي المد هاتين ، تجد منطقة من الجزر لأن ارتفاع الماء في منطقة يعنى بالضرورة انخفاضه في منطقة أخرى.

ونتيجة لدوران الأرض ، فإن مستوى البحر في أي بقعة من الكوكب يرتفع وينخفض بالتناوب مرتين في اليوم. وقوة المد والجزر هذه تقدر عالميا بثلاثة بلايين كيلو وات ، إلا أنه لا يمكن تسخير كل هذه القوة الهائلة. وهناك ما يقارب الاثنتي عشرة محطة في العالم ، قابلة لإنتاج الطاقة في العالم إلا أن صناعة هذه المحطات يحتاج إلى وجود ظاهرة ضخمة للمد والجزر . فالمستوى بين المد والجزر يجب أن يتعدى العشرة أمتار على الأقل ، أضف إلى ذلك أن المحطة يجب أن تكون بجوار (خزان) هائل ، قدر الامكان. لهذا يجب بناؤه في خليج ، أو عند مصب نهر. وفوق الحاجز أو السد الذي يفصل الخليج أو مصب النهر عن البحر تبني محطة الطاقة.



فكرة المد والجزر Figure 6-19

ومن الأماكن التي يكثر فيها المد والجزر السواحل الشمالية للخليج العربي في منطقة الكويت حيث يصل أعلى مد إلى ارتفاع 11 مترا .

6.5.1 فكرة التوليد

كما ذكرنا فإنه يمكن تنفيذ هذه المحطات في الأماكن التي يكون هناك فرق كبير بين المد والجزر خلال الشهر كشرط أول . أما الشرط الثاني فهو وجود مكان (مخرج) ضيق على خليج مثلا لبناء سد بين البحر والخليج الصغير الذي يمثل خزان للمياه أو ما يسمى مستوعب للمياه. والدورة تبدأ من أيام المد العالية حيث تفيض المياه إلى الخزان من خلال السد ويمكن توليد كهرباء في هذه الفترة. ثم عندما تبدأ أيام الجزر ، وفيها يكون الماء في الخزان أعلى منه في المحيط ، فترجع المياه بفضل فرق الارتفاع وتتولد الكهرباء مرة أخرى. والشكل 6-20 يبين هذه الفكرة بوضوح.



Figure 6-20 محطة توليد باستخدام المد والجزر

كمية الطاقة التي يتم توليدها تعتمد كما ذكرنا على فرق ارتفاع المد والجزر ، وعلى كمية المياه التي يتم تخزينها في المستوعبات. يمكن للمضخات أن تعمل في كلا الاتجاهين. حتى أنها يمكن أن تعمل أثناء حركة المد. يمكن استخدام المضخات أيضا لرفع مستوى المياه في المستوعبات إلى ما هو أعلى من مستوى البحر. حين يكون ذلك ممكنا ، وخصوصا عندما يقل الطلب على استهلاك الطاقة ، وتحديدًا في فترة الليل. يتم تفريغ المياه بعد ذلك إلى البحر ، حين يزداد الطلب على الكهرباء .

يلاحظ أيضا أن المراجع العلمية لا تسميه سدا ولكن تسميه حاجزا لكونه صغير مقارنة بالسدود المعروفة. ونشير هنا إلى أنه قد تم بناء أول محطة توليد تعتمد على المد والجزر في فرنسا حيث تم استقطاع المستوعب من البحر كما في الشكل 6-21. وبالطبع فإحدى فوائد محطات التوليد من المد والجزر أنها تنتج كميات هائلة من الطاقة دون أن تلوث البيئة.



محطة في فرنسا Figure 6-21

المثال الخامس من محطات الطاقة الجديدة

محطات الرياح

6.6 طاقة الرياح

استخدمت طاقة الرياح منذ آلاف السنين في دفع المراكب على سطح الماء وطحن الحبوب والري وفي ضخ المياه ، إلى جانب بعض التطبيقات الميكانيكية الأخرى . وتشير المراجع العلمية والمخطوطات التاريخية إلى أن الفرس هم أول من استخدم طاقة الرياح في طحن الحبوب وضخ المياه.

ونشير هنا إلى أن سيدنا عمر بن الخطاب رضي الله عنه قبل استشهاده بيومين على يد أبي لؤلؤة المجوسي دار بينهما حوار ، سأله عمر فيه عن طواحين الرياح فأجاب أبو لؤلؤة أنه يستطيع صنعها فطلب منه سيدنا عمر أن يصنع للمسلمين واحدة ، إلا أن أبا لؤلؤة غدر به وقتله.

أما في أوروبا فقد انتشرت طواحين الرياح "Wind Mills" منذ القرن الثاني عشر حتى وصل عددها في عام 1750 ميلادية إلى أكثر من 8000 طاحونة في هولندا وأكثر من 10000 طاحونة في إنجلترا ، كان الغرض الرئيسي لعملها هو ضخ المياه "Water Pumping" من المناطق المنخفضة إلى مناطق الزراعات المرتفعة ، أو إدارة أحجار "الرحى" لطحن حبوب القمح والدرة وغيرها.

6.6.1 الطاقة الشمسية هي مصدر الرياح

تتولد الرياح نتيجة لامتناس سطح الأرض والبحار والمحيطات لأشعة الشمس "Solar Radiation" وبالتالي ترتفع درجة حرارة هذه الأسطح بدرجات مختلفة ، وعندما يسخن الهواء فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض كثافته ، وتبعاً لذلك ينتقل الهواء من منطقة الضغط المرتفع (حيث يقل الإشعاع الشمسي) إلى منطقة الضغط المنخفض (حيث الإشعاع الشمسي الأعلى) مما يؤدي إلى نشوء الرياح.

6.6.2 كيف تعمل توربينات الرياح ؟

المكونات الرئيسية لتوربين الرياح هي ريش دوارة تحمل على عمود ومولد يعمل على تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية ، فعندما تمر الرياح على الريش تخلق دفعة هواء ديناميكية تتسبب في دوران الشفرات ، وهذا الدوران يشغل المولد فينتج طاقة كهربائية ، كما جهزت تلك التوربينات بجهاز تحكم في دوران الريش لتنظيم معدلات دورانها ووقف حركتها إذا لزم الأمر .

تعتمد كمية الطاقة المنتجة من توربين الرياح على سرعة الرياح وقطر الشفرات ؛ لذلك توضع التوربينات التي تستخدم لتشغيل المصانع أو للإضاءة فوق أبراج ؛ لأن سرعة الرياح تزداد مع الارتفاع عن سطح الأرض ، ويتم وضع تلك التوربينات بأعداد كبيرة على مساحات واسعة من الأرض لإنتاج أكبر كمية من الكهرباء .

تنتج الولايات المتحدة وحدها سنوياً حوالي 3 بليون كيلو وات في الساعة (تلك الكمية تكفي لسد احتياجات مليون شخص من الكهرباء) ، وذلك من حقول الرياح الموجود معظمها في كاليفورنيا على الساحل الغربي لأمريكا .

ولأن هناك بعض الأوقات التي تقل فيها سرعة الرياح ، مما يصعب معه إنتاج الطاقة الكهربائية ، فإن مستخدمي طاقة الرياح يجب أن يكون لديهم مولداً احتياطياً يعمل بالديزل أو بالطاقة الشمسية لاستخدامه في تلك الأوقات .

والمكان الأفضل لوضع التوربينات (عمل حقل رياح) يجب ألا يقل متوسط سرعة الرياح فيه سنوياً عن 12 ميل في الساعة .

ومعظم مزارع الرياح تقام على اليابسة ، لكن ونظراً للتأثير المهم لسرعة الرياح على الطاقة المولدة فإن بعضاً من مزارع الرياح تقام داخل المياه ويطلق عليها المزارع البحرية "Off-Shore Wind Farms" حيث ترتفع سرعات الرياح عنها في اليابسة (شكل 6-22).



مزرعة رياح ميدلجروندن البحرية الواقعة خارج ميناء كوينهاجن



جانب من مزرعة الرياح بالزعرانة

Figure 6-22

6.6.3 مكونات محطة توليد الكهرباء من الرياح

تتكون مروحة التوليد كما في الشكل 6-23 من:

- 1- عدد 2 إلى 3 ريشة Rotor Blades وتصل في الطول إلى 20 متر للريشة ، وفي الأنواع الجديدة مثل وحدة الـ 5 ميغا يتجاوز قطر الدوران 130 متر.

2- صندوق تروس Gear Box وتربط بين :

- a. محور السرعة البطيئة الذى تركيب عليه الريش وهو يدور بسرعة حوالي 30 لفة فى الدقيقة
- b. محور السرعة العالية وهو الذى يصل مباشرة للمولد ويدور بسرعة 1500 لفة فى الدقيقة
- 3- غرفة القمرة التى تسمى Nacelle ، وتشتمل على المولد والتروس فهى بمثابة Housing لكل المعدات ، وتشتمل أيضا على المعدات التى تتحكم فى الريش ، حيث يمكنها تغيير زاوية ميل الريشة بالنسبة للرياح بواسطة موتور ، وبالتالي تتحكم فى سرعة الدوران التى تقاس بلفة /ثانية متأثرة بسرعة الرياح والتى يجب ألا تقل عن 5 متر فى الثانية. ويجب ألا تزيد عن 30 م/ث.

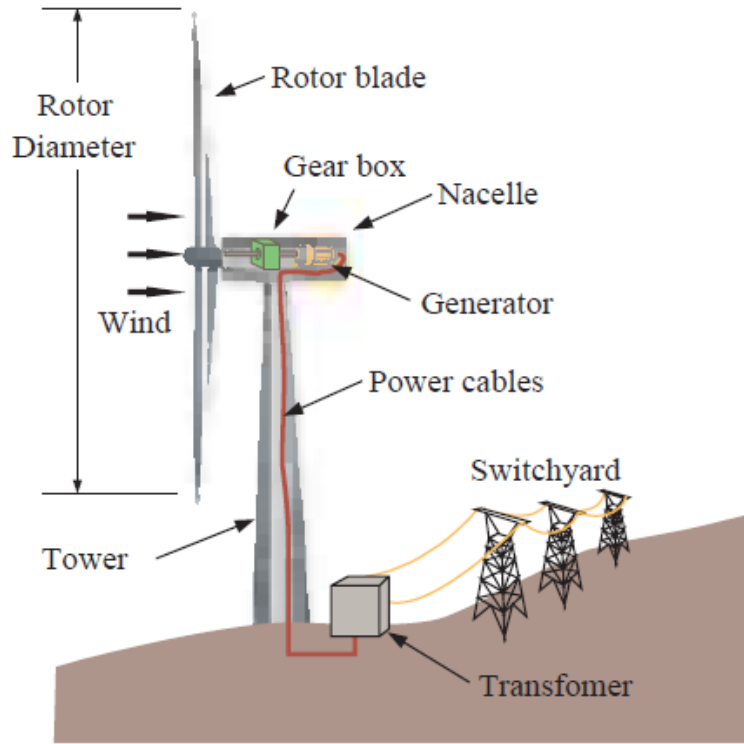


Figure 6-23 مكونات محطة الرياح

- 4- مولد كهربى وتتراوح قدرته من 500 إلى 1500 كيلووات وبعض المولدات وصلت الآن إلى 3 و 5 و 6 و 7 ميجا وات .
- 5- يقوم المحول الخاص بالوحدة بنقل القدرة بجهد توزيع (حوالي 24 kv) عبر كابلات و يتم تجميعه مع الوحدات الأخرى ثم الرفع إلى خطوط النقل ، و لا يتم اتصال كل وحدة مباشرة مع خطوط النقل.
- 6- والجميع (ماعد المحول) مثبتون فى أعلى برج التوليد Tower والمصنوع من الاستيل ويبلغ ارتفاعه من 40 إلى 60 متر ، وحاليا يتجاوز الارتفاع 140 متر مع قدرات 5 ميجا. ويُصنع البرج من الحديد المعالج حراريا ليتحمل مكونات الحاوية الـ Nacelle والتي يصل وزنها إلى قرابة الثلاثين طن.

في بدء التشغيل يعتمد المولد الحثي Induction Generator على سحب تيار كهربائي من الشبكة الكهربائية والذي يكون ذو تردد ثابت (50 هيرتز في مصر) مع نسبة تغير طفيفة ($\pm 0.5\%$) ، وهو ما يعني أن التربينات تعمل في البداية كموتور حتى تصل سرعة دوران الريش إلى قيمة تختلف بحسب تصميم التربينات (مثلا 27 لفة/دقيقة) ، بعدها يترك الأمر لقوة الرياح لاستكمال تدوير التربينات وإنتاج الكهرباء.

ولضمان الاستفادة بأقصى قدر من طاقة الرياح ، يستخدم نظام لتوجيه " التربينات في اتجاه الرياح Yawing " ، فإذا ارتفعت سرعة الرياح عن 25 متر/ثانية فإن الفرامل "Brakes" تمنع الريش من الدوران مخافة أن تؤدي سرعة الرياح العالية إلى تحطمها وتكسير الأجزاء الدوّارة في الحاوية "Nacelle".

6.6.4 كمية الطاقة المولدة من الرياح

تتوقف كمية الطاقة المولدة بالرياح بشكل كلي على الطاقة الحركية للهواء والتي تتناسب طرديا مع كتلة الهواء وسرعته. والمعادلة التالية تبين ذلك بدلالة مساحة المروحة وكثافة الهواء كما يلي:

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times C_p \times V^3$$

where:

P = power in watts (746 watts = 1 hp)

ρ = air density (about 1.225 kg/m³ at sea level)

A = rotor area exposed to the wind (m²)

V = upstream wind speed in meters/sec

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2}$$

V₀ (downstream wind velocity of the exit of the rotor blades)

6.7 العوامل المؤثرة في إنتاج الطاقة

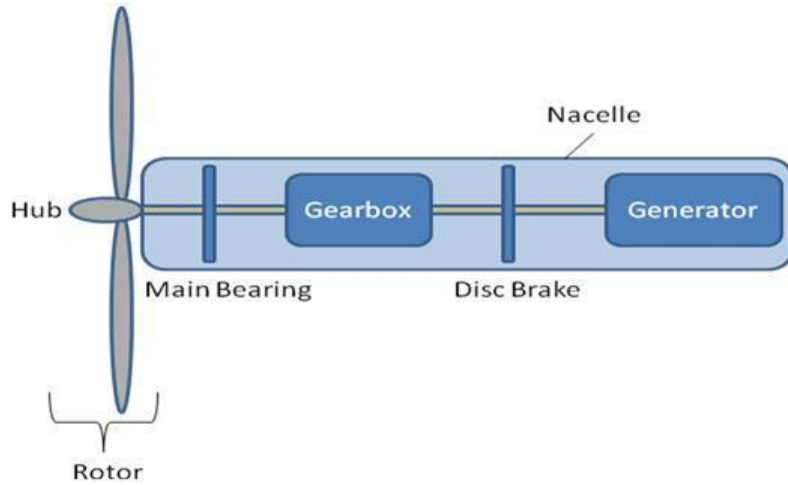
1- سرعة الرياح : يتأثر إنتاج توربينات الرياح تأثرا مباشرا بسرعة الرياح حيث تتناسب الطاقة المنتجة مع مكعب السرعة ، ولبيان هذه العلاقة نضرب المثال التالي ، إذا كانت سرعة الرياح 5 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تعادل - تقريبا- 125 وحدة طاقة ، فإذا ارتفعت السرعة وأصبحت 6 متر/ثانية فإن الطاقة الناتجة تزيد إلى 216 وحدة طاقة. ويبين هذا المثال البسيط كيف أن ارتفاع سرعة الرياح بمقدار 1 متر/ثانية أدى إلى زيادة كبيرة في الطاقة المنتجة ، أيضا تتأثر الطاقة المنتجة من التوربينات بعوامل

أخرى منها كثافة الهواء وارتفاع البرج ومساحة سطح الدوران وتأثير التوربينات على بعضها البعض "Wake Effect" ، إلا أن التأثير المباشر يكون مع سرعة الرياح.

2- مساحة سطح الدوران "Swept Area": تعبر مساحة سطح الدوران عن المساحة الناشئة عن دوران الريش والتي تتحدد بطول الريشة وبالتالي حجم الهواء الذي يضرب مستوى الدوران ، ويطلق أيضا على مساحة سطح الدوران قطر التربينه.

3- نسبة سرعة سن الريشة "Tip-Speed Ratio": هي النسبة بين السرعة عند نهاية الريشة "سن الريشة Tip Blade" وسرعة الرياح ، والتي تزيد كلما زاد طول الريشة ، وتتحدد حدودها المثلي بين 60 - 80.

وعندما تهب الرياح على التربينه يدور الـ Rotor تبعاً للقوى الايروديناميكية و يتم نقل هذه الحركة إلى المولد عن طريق محورين و صندوق تروس سرعة (محور السرعة البطيئة ومحور السرعة العالية) ونسبة النقل لصندوق التروس تحدد السرعة التي سوف تصل للمولد. والشكل 6-24 يوضح معظم مكونات تربينة الرياح في القمرة وفيها أيضا محركات السيرفو التي تقوم بتغيير جهة الريش تبعاً للرياح التي تهب على التربينه.



قمرة التربينه Figure 6-24

6.7.1 زاوية الهجوم:

مساحة السطح التي تهب عليها الرياح هي أحد المؤشرات الهامة لزيادة القوة الايروديناميكية على ريش التربينه . لذلك فإن الزاوية التي يتم تغيير الريش لمواجهة الرياح عليها هي زاوية مهمة جدا و تدعى زاوية الهجوم α .

وزاوية الهجوم الحرجة تعرف بأنها الزاوية التي لا يمر عندها أي تيار هوائي على الشفرات ، ويوضح الشكل 6-25 زاوية الهجوم ، وزاوية الهجوم الحرجة.

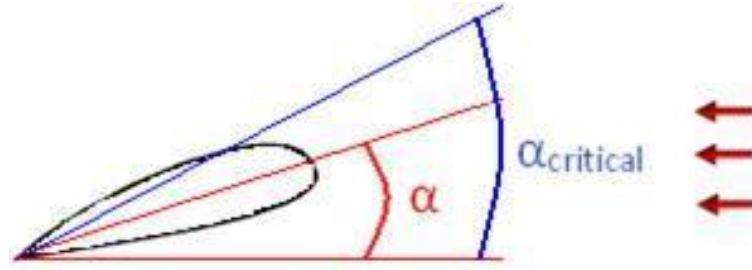


Figure 6-25 زوايا الهجوم

6.7.2 منحنى القدرة :

يوضح هذا المنحني (شكل 6-26) العلاقة بين القدرة المنتجة من التربينه وسرعة الرياح ، وهو محدد رئيسي لتحديد نوع التحكم المطلوب استخدامه في التربينه.

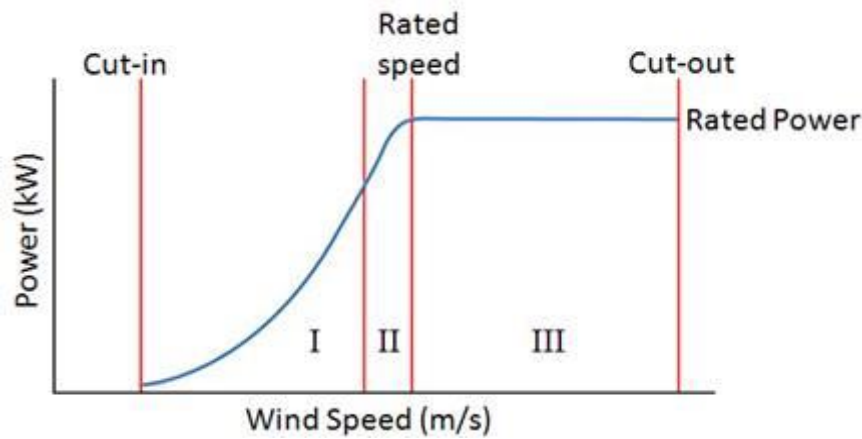


Figure 6-26 cut-in and cut-off speed

يوضح الشكل السابق منطقة تشغيل التربينه بين الـ Cut in Speed و الـ Cut out Speed وفي هذه المنطقة يكون تشغيل التربينه ضمن الحدود التي تسمح بها قدرتها و تبقياها في حدود أمان التشغيل وتساعد في الحفاظ على بنيتها .

في المنطقة الأولى و الثانية و عندما تكون سرعات الرياح قليلة يتم تعديل الريش للحصول على أعظم قدرة ، أما في المنطقة الثالثة و عندما تكون السرعات عالية و فوق سرعة الرياح الاسمية المصممة عليها التربينه يتم تعديل الريش لتقليل تأثير سرعة الرياح و الحفاظ على التربينه من السرعات العالية.

6.7.3 مميزات طاقة الرياح وعيوبها :

- طاقة الرياح طاقة محلية متجددة ولا ينتج عنها غازات أو ملوثات ، وبالتالي فإن تأثيرها الضار بالبيئة طفيف .
- 95% من الأراضي المستخدمة كحقول للرياح يمكن استخدامها في أغراض أخرى مثل الزراعة أو الرعي ، كما يمكن وضع التوربينات - الصغيرة بالطبع - فوق المباني .
- التأثير البصري لدوران التوربينات والضوضاء الصادرة عنها قد تزج الأشخاص القاطنين بجوار حقول الرياح ، ولتقليل هذه التأثيرات يفضل إنشاء حقول الرياح في مناطق بعيدة عن المناطق السكنية .
- تتسبب التوربينات العملاقة أحيانا في قتل بعض الطيور خاصة أثناء فترات هجرتهم ، ويتم حاليا دراسة تأثيرها على انقراض بعض أنواع الطيور ، ولكن النتائج المبدئية تشير إلى أن التوربينات ليس لها هذا التأثير الشديد .
- ومن أبرز مشاكل محطات الرياح مشكلة الضوضاء وقد تم التغلب عليها بتحسين تصاميم الريش لتقليل الضوضاء .
- ومن المشاكل أيضا الصدأ والتآكل ويعالج ذلك بطلاء الريش بمادة خاصة لمنع الصدأ.

6.7.4 ترتيب التوربينات في مزارع الرياح

للحصول على هندسة معقولة للمزرعة يجب أن تكون الأبعاد بين صفوف التوربينات (5-9 D) ، وذلك باتجاه الرياح السائدة و(3-5 D) بالاتجاه المعامد لاتجاه الرياح ، حيث D ترمز للقطر Diameter الخاص بالشفرات كما يبين الشكل 6-27.

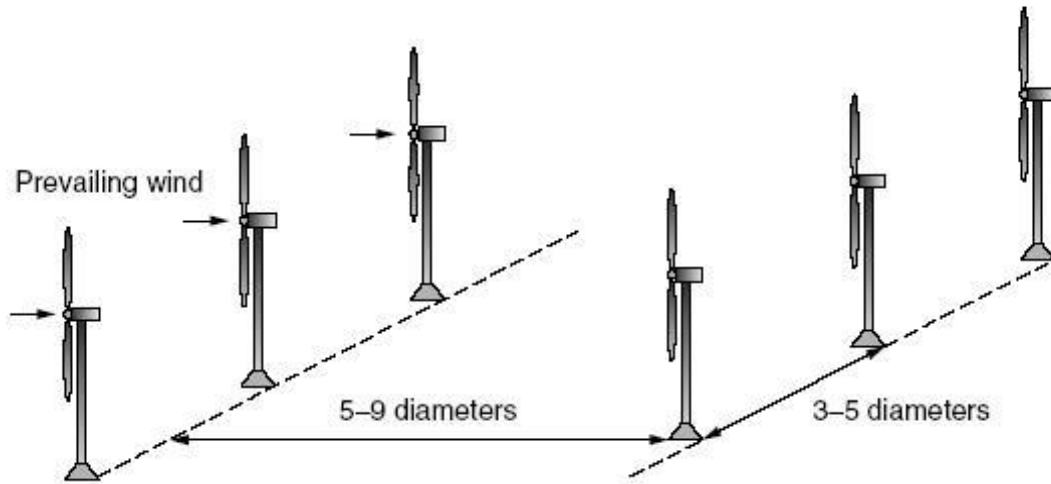


Figure 6-27 أبعاد توزيع التوربينات

وغالبا ما تتوضع التربينات على مسافة 5D في اتجاه الرياح السائدة (بين الصفوف) وعلى مسافة 3D في الاتجاه المعامد للرياح (بين التربينات). في هذه الحالة نميز نوعين من التوزيع:

1- التوزيع الطبيعي Natural distribution

وفيه يتم توزيع التربينات وراء بعضها بالترتيب كما في الشكل 6-28 :

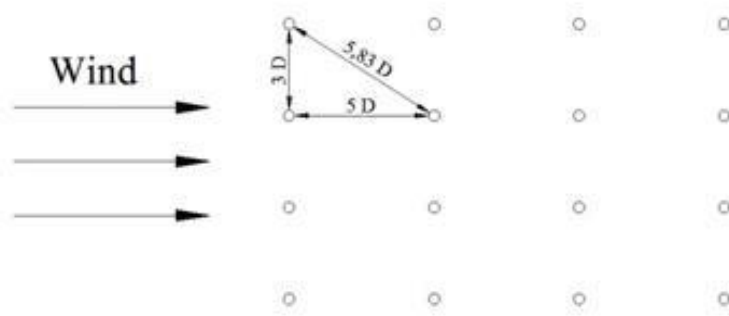


Figure 6-28

التوزيع الطبيعي للتربينات

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التربينات باتجاه الرياح 5D ، والمسافة بين التربينات بالاتجاه المعامد للرياح 3D ، وتكون مساحة الأرض اللازمة للتurbine الواحدة 5D*3D.

2) التوزيع الشطرنجي

وفيه يتم توزيع التربينات بالتناوب كرقعة الشطرنج فتكون مثلا الأبعاد بين الصفوف 5D كما في الشكل 6-29:

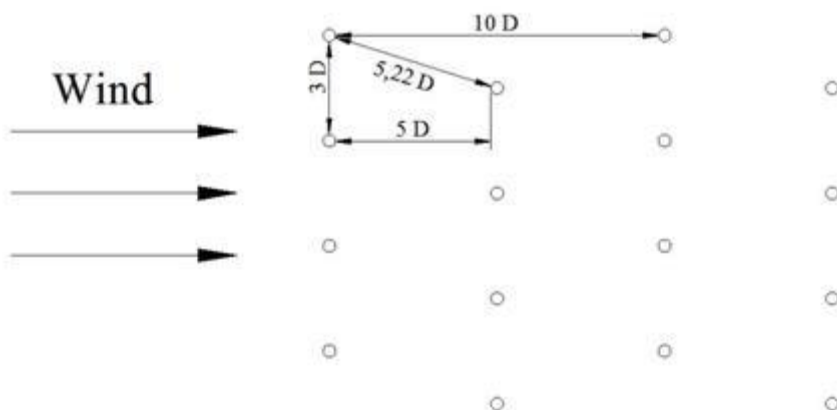


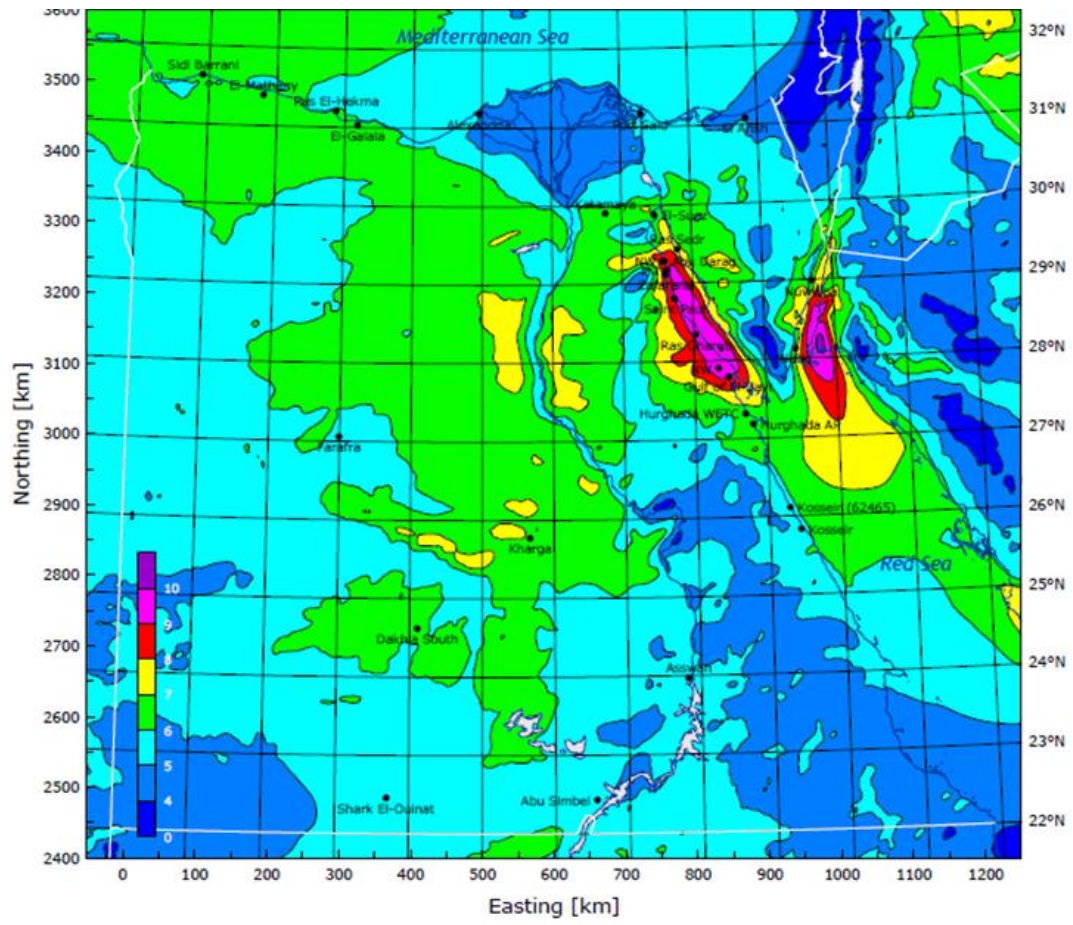
Figure 6-29

التوزيع الشطرنجي للتربينات

في هذا النوع تكون المسافة بين صفوف التربينات باتجاه الريح 5D ، و تكون المسافة بين تربنتين متتاليتين 10D ، والمسافة بين التربينات بالاتجاه المتعامد للريح 3D. في هذه الحالة تتضاعف المسافة بين التربينات باتجاه الرياح بنفس مساحة الأرض اللازمة.

6.8 طاقة الرياح في مصر

- تتميز مصر بنشاط رياح ثابت نسبياً و معدل سرعة يصل إلى (10 أمتار في الثانية) و ذلك في منطقة خليج السويس و ساحل البحر الأحمر بين رأس غارب و سفاجا ، و في منطقة شرق العوينات.
- وبصفة عامة تكون سرعات الرياح في شهور الصيف أعلى منها في شهور الشتاء في تلك المناطق ، ويصل المتوسط السنوي لسرعة الرياح بالزعفرانة حوالي 9 متر/ثانية على ارتفاع 25 متر ، في حين أنها تصل إلى 10.5 متر/ثانية في منطقة جبل الزيت عند نفس الارتفاع.
- تم إنشاء محطات رياح لتوليد الكهرباء بالگردقة و الزعفرانة ، ، توفر استهلاكاً من الوقود البترولي يصل إلى حوالي 125 ألف طن بترول متكافئ سنوياً الأمر الذي ينعكس إيجابياً على اقتصاديات مشروعات الطاقة المتجددة.
- في 2014 تم تشغيل مشروع طاقة الرياح في منطقة جبل الزيت بقدرة 200 ميغا وات
- في مارس 2003 صدر أطلس رياح تفصيلي (جزء منه في الشكل 6-30) لخليج السويس بالتعاون مع معامل ريزو الدنماركية ، وفي فبراير 2006 صدر أطلس رياح جمهورية مصر العربية. وقد بلغت القدرة المركبة الإجمالية في 2014 حوالي 500 ميغاوات ، ومن المتوقع الوصول بإجمالي طاقة الرياح إلى نحو 12% من الطاقة الكهربائية المولدة عام 2020.



صورة من أطلس الرياح في مصر Figure 6-30

6.9 محطات الرياح في البحار والمحيطات



Figure 6-31 off-shore wind station

الرياح البحرية تميل للتدفق بسرعة وقوة أكبر من الرياح على اليابسة ، ذلك لأن خشونة سطح البحر أقل منها عند اليابسة وعوائق هبوب الرياح أقل وبالتالي فإن ذلك يسمح للتربينات الرياح بتوليد طاقة كهربائية بشكل أكبر .

وبما أن الطاقة المستخرجة من الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح ، فإن أي زيادة بسيطة في سرعة الرياح يمكنها أن تحقق زيادة ملحوظة في الطاقة الكهربائية المتولدة ، على سبيل المثال تربينة الرياح المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 16 ميل بالساعة (7 متر بالثانية) تنتج أكثر ب 50% من نفس تربينة المتواجدة في موقع سرعة الرياح فيه 14 ميل بالساعة (6 م بالثانية)

مميزات وضع تربينات الرياح في البحر :

1- انخفاض نسبة الضجيج الصوتي: أن تربينات الرياح خلال عملها تعمل على بعث صوت مزعج والذي أدى إلى التسبب بمشاكل للناس الذين يسكنون في المناطق المجاورة للمحطة الرياح ، حتى أن بعض المزارعين يشكون بأن مواشهم تتأثر بالضجيج الصادر عن شفرات تربينة الرياح ، لذلك تواجد تربينات الرياح في البحر (شكل 6-31) يخفف من تأثير هذه المشكلة سواء على الإنسان أو الحيوانات التي تعيش في المناطق المجاورة.

2- لا تشكل تهديد على حياة الطيور المهاجرة: تربينات الرياح المتواجدة على ارض اليابسة غالباً ما تسبب مقتل العديد من الطيور المصطدمة بشفراتها المتحركة ، على الرغم من أن هذه المشكلة تعمل بعض الدول التي تعتمد على طاقة الرياح على تفاديها بعدم إنشاء محطات ربح على طريق هجرة الطيور ، وتربينات الرياح في البحار تنهي هذه المشكلة حيث أن الطيور نادراً ما تطير فوق المحيطات.

3- لا يوجد لتربينات الرياح تأثير بصري كبير حيث أنها توضع بعيدة عن أماكن السكن ، فهي لا تؤثر على المنظر العام.

السلبية الوحيدة لتربينات الرياح في البحار بالنسبة للتربينات على اليابسة هو التكلفة ، حيث من الممكن أن تزيد كلفة الطاقة المولدة عن هذه تربينات بحوالي (2.5 إلى 3.5 مرة) عن تلك المتواجدة على اليابسة ولكن على أية حال مازالت تربينات الرياح في البحار صناعة قيد التطوير وهذه التكلفة العالية ستخف مع الزمن ، علماً بأن التكلفة العالية بسبب ظروف العمل الصعبة لتركيب وصيانة تربينات في البحار والتي تتطلب الاستعانة بسفن خاصة لتركيبها في مياه البحر .

أسطورة المولدات من النوع Free Energy

اختتم هذا الفصل بالتعليق على المولدات الموجودة على الإنترنت والتي تسمى Free energy generator وملخصها أنها تتكون من Rotor + Stator كما في المولدات العادية لكنها هنا لا تحتوى على ملفات بل تحتوى على أقطاب مغناطيسية من النوع Permanent magnet بحيث تركيب كمية ضخمة من الأقطاب على الـ Rotor وكمية أخرى ضخمة على الـ Stator ويكون دائما الأقطاب المتواجهة في الـ Rotor and stator داخل الـ Air gap متشابهة (شمالى يواجه شمالى أو جنوبى يواجه جنوبى) ، وتبدأ القصة فى مثل هذه الفيديوهات بأن يدار هذا المولد يدويا أولا ، ثم يترك بدون توصيله بأى مصدر خارجى للطاقة الحركية وتجده فعلا يستمر فى الدوران (بفعل التنافر بين الأقطاب) .

والحقيقة أن هذه الطاقة الحركية بغض النظر عن مدتها التى تطول أو تقصر حسب حجم الأقطاب فإن المشكلة الأساسية فيها هى أنها ضعيفة ولا يمكن من هذه الطاقة الحركية تغذية محرك 50 حصان مثلا ، ولكن لما كانت الأقطاب المستخدمة ضخمة فإنها يمكن أن تستمر بفعل القصور الذاتى لمدة طويلة نسبيا ، ويمكن خلال هذه المدة توليد طاقة كهربائية كافية لتضىء بعض اللمبات الموفرة كما فى الفيديوهات الموجودة على الإنترنت أو سخان صغير ، ولكن لا يمكن أن تغذى حملا كبيرا ولا يمكن أن تستمر لساعات فى تغذية الأحمال الصغيرة ، ولذا تجد هذه الفيديوهات لا تتعدى دقائق.

Appendix A

اقتصاديات محطات التوليد

هذا الملحق يمثل الختام الطبيعي لأي حديث عن محطات التوليد ، ففي الفصول السابقة تناولنا فنيات عديدة لمحطات التوليد بأنواعها المختلفة ، لكن الواقع العملي يحكم بأن الفنيات وحدها ليست الفيصل في اختيار نوع المحطة التي نود إنشاءها ، وربما كانت إقتصاديات محطات التوليد هي الفيصل في الاختيار بين أنواع عديدة من المحطات.

وفي هذا الملحق سنتناول بعض المصطلحات الاقتصادية التي تخدم الموضوع ، ثم نشرح العوامل المؤثرة على اقتصاديات محطات التوليد ، ونختم الفصل بمقارنة بين أسعار المحطات طبقا لما أعلنته وزارة الطاقة الأمريكية في إصدار سنة 2013.

ملحوظة:

سيلاحظ القارئ أني أرجع كثيرا لإحصائيات أمريكية في هذا الملحق وغيره من الفصول ، والسبب أن الوزارات هناك تطبق مبدأ الشفافية حرفيا ، فلا يوجد أسرار تخفى عن الناس بخصوص أسعار المحطات أو عن الشركات المنفذة ، ولا كم حصلت إلخ . ويمكن للقارئ الرجوع لهذه التقارير ليعرف حجم الشفافية الموجودة في هذه البلاد.!!!

العوامل المؤثرة في اقتصاديات المحطات

عند بناء محطة توليد ، فإن هناك العديد من الاعتبارات الفنية والاقتصادية التي تؤثر في تصميم المحطة . وما يهمنا هنا هو الاعتبارات المؤثرة إقتصاديا ، ومنها:

- 4- موقع المحطة (سعر الأرض يختلف من مكان لآخر)
- 5- تواجد عمالة تسكن بالقرب من مكان المحطة ، وإلا ستأخذ في الاعتبار تكلفة إعاشة العمال ومواصلاتهم (في البلاد المتقدمة) .
- 6- تكلفة الإنشاء والتصميم
- 7- مصاريف التشغيل والصيانة
- 8- تكلفة إنتاج الـ kWh من المحطة
- 9- تكلفة خدمة الدين (القرض) إذا كانت منشأة بقرض من البنوك

وعموما يمكن تقسيم المصروفات في المحطات إلى نوعين :

1- **مصروفات ثابتة :** تشمل تكلفة الإنشاء وفوائد قرض الإنشاء ، والتأمين والضرائب التي تفرضها الدولة على عائدات بيع إنتاج المحطة إذا كانت قطاعا خاصا (إذا كانت المحطة ملكا للدولة فإن الضرائب يدفعها المستهلكون لهذه الكهرباء ، بمعنى أن يضاف إلى تعريف الاستهلاك نسبة أخرى للضرائب)
علما بأن تكلفة الإنشاء تشمل ثمن الأرض والمباني و ثمن المعدات ، ومصاريف تركيب المعدات ، ومصاريف التصميم والتخطيط إلخ .
ويضاف أيضا تكلفة المخازن ، والحراسة ، فالمحطة تحتاج لمخازن ضخمة لتخزين الوقود وزيوت التشحيم وقطع الغيار إلخ لأن هذه الأشياء يجب أن تكون حاضرة دائما تحسبا لأي صيانة علاجية محتملة.

2- **مصروفات جارية (وهى متغيرة حسب حجم الإنتاج ، وتشمل تكلفة الوقود والأجور وتكلفة الصيانة ومستلزمات الإنتاج).**
وتعتبر تكلفة الوقود هى الأكثر تأثيرا فى محطات الكهرباء (باستثناء المحطات المائية والتي هى الأقل فى مصاريف التشغيل ، وحتى مصاريف العمالة تعتبر هى أيضا الأقل فى المحطات المائية مقارنة بالمحطات البخارية مثلا التى تحتاج عمالة أكثر بكثير) . وتتوقف تكلفة الوقود على كمية الإنتاج وسعر الوقود وكفاءة المحطة. ودائما يجب البحث عن أفضل طرق تقليل استهلاك الوقود بالمحطة.

وفى المحطات البخارية مثلا يكون توزيع نسب التكلفة بين العناصر السابقة فى حدود النسب التالية:

Fuel cost =	30 to 40%
Fixed charges for the plant =	50 to 60%
Operation and maintenance cost =	5 to 10%

معدل الفائدة Rate of Interest

قد يكون بناء المحطة بواسطة قرض من بنك أو بواسطة استثمارات من شركات أو مجموعة أفراد ، فى كل الأحوال فصاحب المال يريد استرجاع ماله ، مضافا إليه مكسب معتبر ، وهو ما نسميه الفائدة ، والتي تساوى الفرق بين المبلغ الأصلي والمبلغ المسترد ، وقد تكون هذه الفائدة محسوبة على أنها فائدة بسيطة ، بمعنى أنها نسبة ثابتة سنويا . وقد تكون فائدة مركبة تتغير قيمتها مع طول المدة.

على سبيل المثال فأنت إذا أودعت 1000 دولار بالبنك بفائدة بسيطة قدرها 3% لمدة 5 سنوات فهذا يعنى أنك ستحصل على 150 دولار كفائدة فى نهاية الخمس سنوات (مبلغ الفائدة يوضع سنويا فى حساب منفصل وتظل الوديعة قيمتها ثابتة عند 1000 دولار) . أما إذا كانت فائدة مركبة فإن العائد (الفائدة) تضاف إلى أصل المبلغ وبالتالي تكون الفائدة (العائد) فى نهاية السنة الثالثة مثلا أعلى من العائد فى نهاية السنة الثانية وهكذا.

معدل الإهلاك Depreciation

إذا كنت تريد إنشاء مشروعا (محطة توليد مثلا) فإنك لا تتوقع فقط أن يحقق ربحا (ناتجا عن بيع الكهرباء المولدة) يغطى مصاريف التشغيل وقدّر معين من الأرباح فقط ، لكنك يجب أن تأخذ فى الاعتبار أن معدات هذا المشروع تتآكل سنويا بفعل التشغيل أو العوامل الجوية أو حتى مجرد التقادم ، ومن ثم لابد من تقدير نسبة معينة لمعدل

الإهلاك تضاف إلى العائد المتوقع وتصرف في تجديد معدات المشروع ، وإذا لم يحقق المشروع عائده المتوقع ومضافا إليه معدل الإهلاك فلن يستطيع أن يحقق نفس الأرباح سنويا بسبب تقادم معداته. ومعدل الإهلاك غالبا لا يكون ثابتا بل متزايد مع تقادم العمر ، وقد يكون التزايد خطيا أو غير خطي ، وعموما هناك عدة طرق لحساب هذا المعامل يمكن الرجوع إليها في مصادرها.

تسعير الكهرباء المبيعة Tariff

بناء على دراسة جميع عناصر التكلفة السابقة يمكن الآن تحديد تعريفة سعر بيع الـ kWh ، فهذا السعر (مضروبا في حجم الإنتاج) يعطى العائد المالى الذى يجب أن يحقق تغطية جميع المصاريف السابقة وتغطية خدمة الدين (إذا كان قرضا من البنك) وتغطية معدلات الإهلاك وتغطية الضرائب وخلافه ، بالإضافة إلى تحقيق مكسب معقول للمستثمرين.

ولكن بالإضافة للعناصر السابقة ، هناك عناصر أخرى يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند تحديد تعريفة البيع للمستهلك منها:

1- كمية الاستهلاك

فليس مقبولا مثلا أن يكون سعر البيع موحدا مهما كان استهلاك العميل بل يجب تشجيع كبار العملاء المستهلكين بتقديم سعر أقل (وهذا لأنه يقدم فى المقابل خدمة أكبر للاقتصاد القومى بالإنتاج الكثيف وتشغيل العمالة). ولذا يجب أن تكون التسعيرة متدرجة ومراعية لحجم الاستهلاك الكثيف جدا.

2- معامل القدرة

كما يجب ألا يكون الحساب موحدا مهما كان معامل القدرة الخاص بالمستهلك كما فى الشكل 1-A.

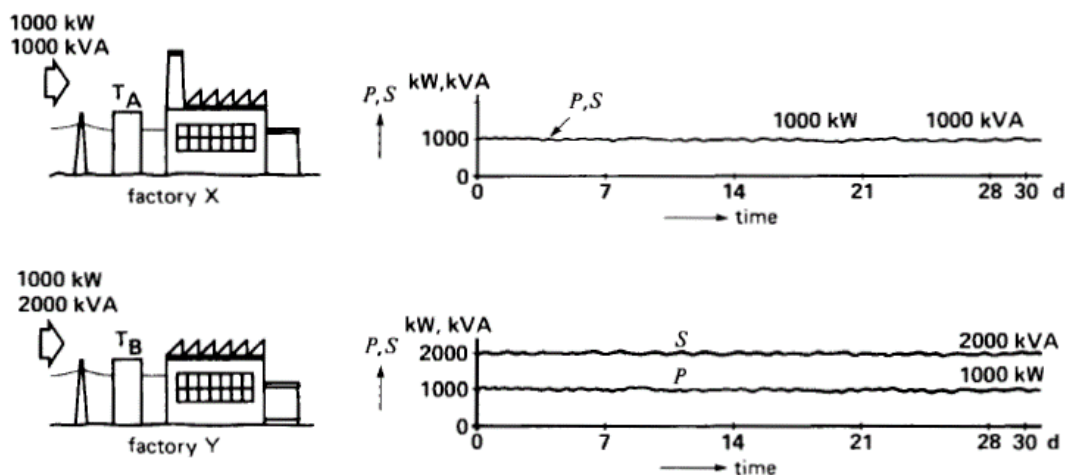


Figure 0-1 تأثير معامل القدرة

فالمصنع الأول له معامل قدرة يساوى 1 والقدرة الفعالة المستهلكة 1 ميجا وات وبالتالي سيحتاج أن يسحب من الشبكة 1MVA ، بينما المصنع الثانى له معامل قدرة 0.5 ويسحب نفس القدرة الفعالة ، ولكنه سيسحب قدرة ظاهرة Apparent Power من الشبكة 2MVA . فلو تمت محاسبة المصنعين على استهلاك الـ KWH فقط وبنفس التسعيرة سيكون هذا غير عادل للشركة المنتجة ، لأنها حجزت للثانى قدرة أكبر ومع ذلك استهلك مثل الأول ، ولذا يجب أن تضم التسعيرة بندا يتعلق بمعامل القدرة ليرغم أصحاب المصانع الذين لديهم معامل قدرة منخفض على تحسين معامل القدرة لديهم وإلا ستكون هناك غرامة تتناسب مع بعد معامل القدرة عن القيمة المطلوبة (غالبا 0.9) مما يجعل الفاتورة قاسية.

3- الحمل الأقصى

ومن المهم أيضا أن تأخذ التسعيرة فى الاعتبار أقصى حمل Max Demand يصل إليه المستهلك ، وكذلك المدة التى يظل يعمل فيها على هذا الحمل الأقصى. فربما كان لدينا مصنعين كما فى الشكل A-2 ، كلاهما يستهلك 720MWH لكن كما هو واضح فى الشكل فإن الأول له Max Demand يساوى 1000kW بينما الثانى يصل إلى ثلاثة أضعافه.

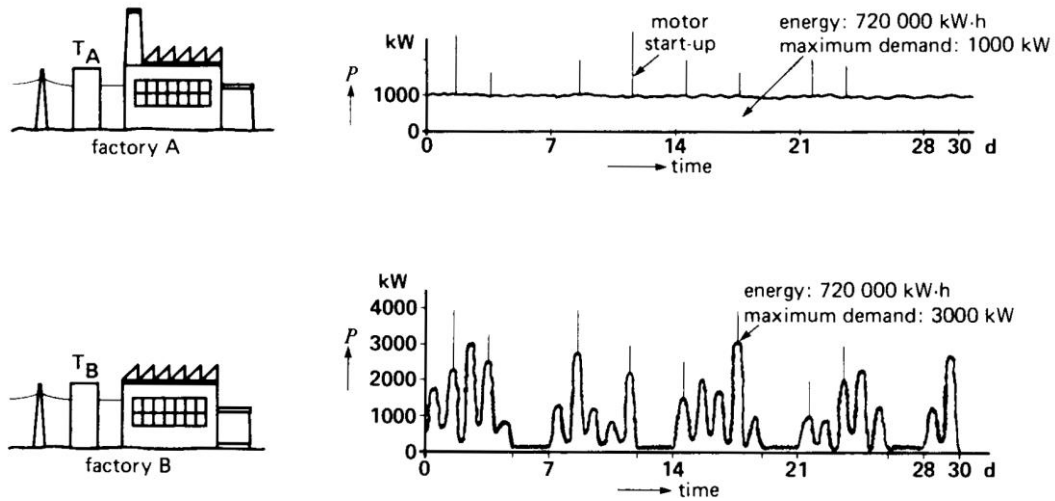


Figure A0-2 تأثير الحمل الأقصى

فهل يستوان؟

بمعنى آخر أن معامل الـ Load Factor للثانى سئ جدا مقارنة بالأول ، وبالطبع يجب التفرقة لاسيما أن الثانى سيتم حجز قدرة تعاقدية له أكبر من الأول حتى يمكن أن توفى الشركة بتعهداتها بتوفير الحمل الأقصى وقت حدوثه ، بغض النظر عن مدة الحدوث . ولذا يجب أن تتضمن الفاتورة بندا يحاسب بسعر خاص (أعلى طبعا) على أقصى قيمة وصل إليها خلال الشهر ومدة حدوثها (توجد عددات خاصة بالمصانع لقياس الـ Max Demand) ، وهذا سيجعل أصحاب المصانع الذين يحتاجون إلى هذه القيمة العالية من الأحمال لمدة وجيزة أن يبحثوا عن أساليب أخرى لتجاوز هذه المدد الصغيرة ، عن طريق استخدام مولدات خاصة بهم مثلا ، أو عن طريق توزيع

الأحمال على مدار اليوم بصورة أفضل ، وتجنب فترة الحمل الأقصى باستخدام أساليب المعروفة بالـ (Demand Management).

4- القدرة التعاقدية

كما يجب الأخذ في الاعتبار حجم التعاقد وحجم التشغيل ، فالبعض قد يتعاقد على قدرة عالية جدا (تحتسب لأي توسعات مستقبلية) ، ويتم توصيل الكابلات والمحولات التي تحقق له هذه القدرة ويتم حجز مغذيات خاصة به في محطة المحولات الرئيسية ، ثم لا يستغل منها إلا قدرا يسيرا في تشغيل مصانعه ، وربما تكون المصانع متوقفة . فلو تمت محاسبة صاحب المصنع فقط على مجرد استهلاكه للكهرباء سيكون هذا كارثيا لشركة الكهرباء التي حجزت له نسبة من قدرتها حسب العقد ثم هو لم يستهلك منها شيئا ، ولذا يجب أن تشمل تعريفه محاسبته نسبة على حجم القدرة المتعاقد عليها سواء استخدم هذه القدرة أم لم يستخدمها.

وكل هذه الاعتبارات أنتجت أساليب متنوعة للـ Tariff منها:

- (1) Flat demand rate
- (2) Straight line meter rate
- (3) Step meter rate
- (4) Block rate tariff
- (5) Two-part tariff
- (6) Three-part tariff.

وكل دولة قد تضيف عناصر أخرى في الاعتبار بعد ذلك ، مثل البعد الإجتماعي الذي يقدم مثلا أسعارا أقل لمن يقل استهلاكهم عن نسبة معينة ، ثم تتزايد الشريحة ، وهكذا.

والجدول 1-A نموذج تسعيرة الكهرباء للاستهلاك المنزلي في مصر (يونيه 2016):

Table 0-1 أسعار الكهرباء للاستهلاك المنزلي في مصر

4- الاستخدامات المنزلية	
نطاق الاستهلاك (ك.و.س / شهر)	السعر (قرن/ك.و.س)
من 0-50	7.5
من 51-100	14.5
من 101-200	16.0
من 201-350	30.5
من 351-650	40.5
من 651-1000	71.0
أكثر من 1000	84.0

لاحظ أن الحساب يبدأ بمأ أعلى شريحة ممكنة ثم الأقل ، وليس العكس ، بمعنى لو كان الاستهلاك 450kWH مثلا ، فهذا يعني أن أعلى شريحة التي تبدأ بـ 351 ، وعلى هذا يكون الحساب كالتالي:

$$100\text{kWH في الشريحة من } 351-650 = 100 \times 0.34 = 34 \text{ جنيه}$$

150kWH فى الشريحة من 201-350 = $150 \times 0.24 = 36$ جنيه

200kWH فى الشريحة من 0-200 = $200 \times 0.16 = 32$ جنيه

ويصبح الإجمالى 102 جنيه ، وهذا قبل إضافة الدمغات والضرائب ورسم التوريد ورسوم تحسين الخدمة ومصاريف النظافة!. لاحظ أنه من الخطأ أن تبدأ الحساب بملأ الشريحة الأولى ثم الثانية وهكذا.

والجدول A-2 يبين أسعار الكهرباء للمصانع التى تغذى مباشرة بالجهد العالى طبقا لمرفق الكهرباء فى مصر:

Table A-0-2 أسعار الكهرباء لعملاء الجهد العالى

1- استخدمات الطاقة على الجهد العالى (132-220 ك.ف)				
المشتركون	مقابل القدرة (جنية/ك.و.شهر)	متوسط سعر الطاقة (قرش/ك.و.س)	خارج الذروة (قرش/ك.و.س)	داخل الذروة (قرش/ك.و.س)
▶ كيما			4.7	
▶ مترو الأنفاق			18.0	
▶ المصانع الكثيفة	15.0	39.6	36.6	54.8
▶ باقى المشتركين	15.0	26.9	24.8	37.2

لاحظ أن شركة كيما لصناعات الألومنيوم بنجع حمادى وأيضاً مترو الأنفاق هما فقط اللذين لهما وضع خاص فى التسعيرة ، كما أن المصانع الكبرى تعامل بسعر أقل من المنازل لأنها تخدم الاقتصاد وتوفر عمالة.

أما فى الجهد المتوسط فتحسب من الجدول A-3 :

Table 0-3 أسعار الكهرباء لعملاء الجهد المتوسط

3- استخدمات الطاقة على الجهد المتوسط (11-22 ك.ف)				
المشتركون	مقابل القدرة (جنية/ك.و.شهر)	متوسط سعر الطاقة (قرش/ك.و.س)	خارج الذروة (قرش/ك.و.س)	داخل الذروة (قرش/ك.و.س)
▶ جميع المشتركين	30.0	43.5	40.2	60.2

لاحظ فيما سبق أن البند الأول يحاسب على القدرة التعاقدية kW ، والبند الثانى يحاسب على الاستهلاك kWH مع التفرقة فى سعر الاستهلاك بين الاستهلاك فى وقت الذروة والاستهلاك خارج وقت الذروة.

وفيما يلى أمثلة لتسعيرة الكهرباء فى بعض الولايات الأمريكية:

أولاً للتعاقدات السكنية (جهد منخفض):

Minimum monthly charge: \$5.00 plus
 first 100 kW·h per month at 5 cents/kW·h
 next 200 kW·h per month at 3 cents/kW·h
 excess over 200 kW·h per month at 2 cents/kW·h

ثانياً للمنشآت التي تغذى بجهد متوسط:

Demand charge: \$3.00 per month per kW of billing demand
 Energy charge: 4 cents/kW·h for the first 100 hours of billing demand
 2 cents/kW·h for the next 50 000 kW·h per month
 1.2 cents/kW·h for the remaining energy

ثالثاً للمنشآت عالية القدرة:

Demand charge: First 75 000 kW of demand per month at \$2.50 per kW
 Excess over 75 000 kW of demand per month at \$2.00 per kW
 Extra charge for any demand in excess of customer's contract demand at \$2.20 per month per kW
 Energy charge: First 20 million kW·h per month at 6.1 mills per kW·h*
 Next 30 million kW·h per month at 6.0 mills per kW·h
 Additional energy at 5.9 mills per kW·h

تعظيم عائد الاستثمار في محطات الكهرباء

إنشاء محطة للتوليد يعتبر مشروعاً ضخماً من كافة النواحي ، ولذا فعلى المستثمر في هذا المجال أن يبحث عن طرق لتعظيم العائد من هذا المشروع ، وتشمل هذه الطرق :

- 1- تحسين اختياراته في مرحلة التصميم ، فعليه أن يعرف أولاً ما هو أنسب نوع من محطات التوليد يمكن أن يبنيه في هذه المنطقة (في المقطع التالي سنورد مقارنة بين أسعار إنشاء الأنواع المختلفة من محطات التوليد). وبالطبع فليس بالضرورة كون تكلفة الإنشاء منخفضة أن تكون هي المحطة الأنسب ، فكما ذكرنا هناك نوع آخر من التكلفة وهي التكلفة الجارية ، كما أن التكلفة الثابتة العالية لا تعني كذلك رفض هذا الاختيار فربما تكون مصاريف التشغيل شبه معدومة كما في حالة الخلايا الشمسية.
- 2- اختيار أفضل المعدات وأطولها عمراً وأعلىها كفاءة.
- 3- كما تشمل هذه الطرق جعل المحطة تعمل أطول فترة ممكنة ، فلا يعقل أن تتفق هذه المليارات ثم لا تجد مشترياً لهذه البضاعة ، ويفضل دائماً أن تعمل المحطة على Load Curve شبه مسطح لأن هذا يعني كفاءة مرتفعة . وارتفاع الكفاءة مع ارتفاع معدل التشغيل سببه أن التكلفة الثابتة ستتوزع على إنتاج أكبر فتكون نسبة التكلفة الثابتة في سعر الـ kWh المنتج صغيرة ، وهذا يجعل الكفاءة Overall Efficiency أعلى.

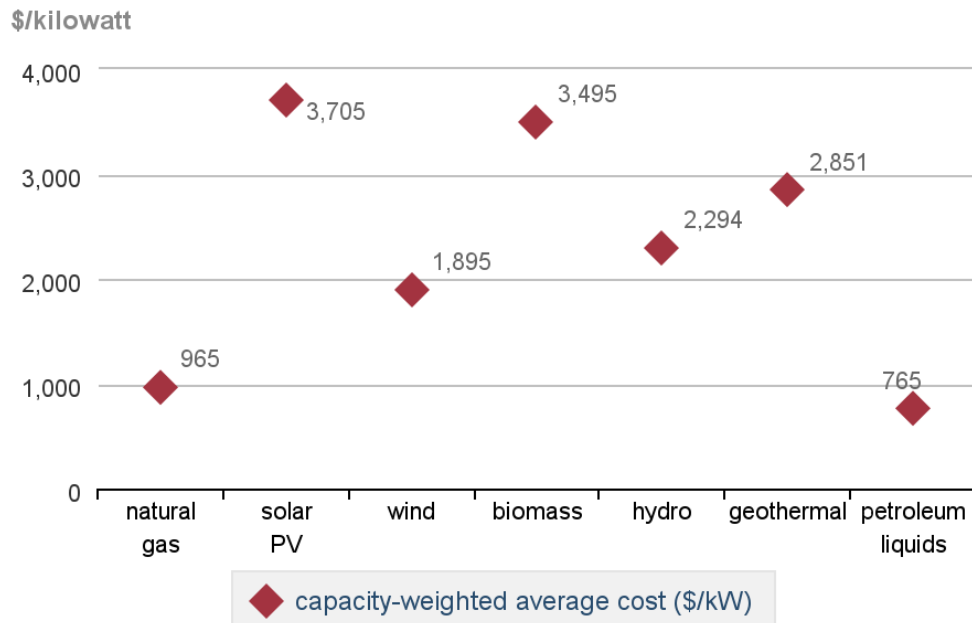
ويمكن الرجوع لبعض المراجع الواردة في الكتاب لتطبيق هذه المعلومات على مسائل حسابية لزيادة الفهم.

مقارنة بين أسعار إنشاء محطات التوليد المختلفة في أمريكا

الأشكال التالية تعطي مؤشرا على أسعار إنشاء محطات التوليد الكهربائية المختلفة في الولايات المتحدة الأمريكية (أرقام رسمية). ويمكن الرجوع للمصدر المكتوب أسفل الصورة لمزيد من التفاصيل.

الشكل A-3 يعطي التكلفة (تكلفة الإنشاء فقط دون التشغيل) بالـ \$/kW حسب نوع محطة التوليد

Average construction cost



Source: U.S. Energy Information Administration

Figure A-0-3 تكلفة إنشاء محطات مختلفة في أمريكا

والجدول A-4 يعطي مؤشرا على تكلفة الـ kWh في المحطات النووية (شاملة الإنشاء والوقود والتشغيل):

Table A 0-4

2015 Cost Summary (\$/MWh)

Category	Number of Plants / Sites	Fuel	Capital	Operating	Total Operating (Fuel + Operating)	Total Generating (Fuel + Capital + Operating)
All U.S.	58*	6.91	7.97	20.62	27.53	35.50
Plant Size						
Single-Unit	23	7.10	10.26	27.15	34.25	44.52
Multi-Unit	35	6.85	7.31	18.74	25.60	32.90
Operator						
Single	12	7.49	9.30	22.05	29.54	38.84
Fleet	46	6.74	7.58	20.21	26.95	34.53

* Costs exclude shutdown plants. Also excludes Fort Calhoun, Fitzpatrick, and Pilgrim because no data was provided for 2015.

Source: Electric Utility Cost Group (EUCG)

والجدول 5-A يعطى أسعار تفصيلية للمحطات النووية في أمريكا حتى عام 2015 ، وستلاحظ تذبذب الأسعار عبر السنين ، وهذا بسبب عوامل عديدة منها أسعار الوقود وأسعار البترول.

Table 0-5

U.S. Nuclear Plant Costs (2015 \$):

Year	Fuel	Capital	Operating	Total
2002	5.73	3.92	18.61	28.27
2003	5.60	4.94	18.87	29.40
2004	5.29	5.66	18.56	29.50
2005	5.02	5.81	18.97	29.80
2006	5.05	5.56	19.23	29.85
2007	5.13	6.12	19.09	30.35
2008	5.36	6.77	19.53	31.66
2009	5.94	8.92	20.52	35.38
2010	6.77	9.17	20.66	36.59
2011	7.10	10.07	21.91	39.08
2012	7.47	10.77	21.50	39.75
2013	7.74	8.21	20.95	36.91
2014	7.22	8.19	20.95	36.35
2015	6.91	7.97	20.62	35.50
2002-2015 Increase	21%	103%	11%	26%
2010-2015 Increase	2%	-13%	0%	-3%

لاحظ أن أسعار إنشاء محطة نووية متذبذب بشكل كبير ، فهو يتراوح في الخمس سنوات الأخيرة بين 5500 \$/kW إلى حوالي 8000\$/kW ، وبمعنى آخر أن سعر كل ميغاوات يتراوح بين 6-9 بليون دولار (شاملة أعباء الدين المقترض من المؤسسات المالية). لاحظ أن السعر من عشر سنوات كان يتراوح بين 1200-1500 \$/kW . والجدول 6-A يعطى أسعار بعض المحطات النووية في الولايات المتحدة حتى سنة 2008.

Table 0-6 أسعار إنشاء محطات نووية أمريكية

Forecast	Overnight Cost (\$/kW)	Total Plant Cost (\$/kW)	Total Plant Cost - 2 Units (billions\$)
DOE (2002)	\$1,200		
	\$1,500		
MIT (2003)	\$2,000		
Keystone Center (2007)	\$2,950	\$3,600	
	\$2,950	\$4,000	
Moody's Investor Services (2007)		\$4,000	
		\$6,000	
Florida Power & Light (2007)	\$3,108	\$5,492	\$12.1
	\$4,540	\$8,081	\$17.8
Progress Energy (2008)			\$14.0
			\$6.4 for 45% of 2 plants
Georgia Power (2008)			



الباب الثاني



نقل القوى الكهربائية

7

أساليب نقل الطاقة الكهربائية

المقصود بنقل الكهرباء هي عملية نقل الطاقة الكهربائية التي ولدتها محطة التوليد إلى محطات التحويل الرئيسية التي ندرسها في الباب الثالث ، تمهيدا لنقلها بعد ذلك للمستهلكين عبر شبكة التوزيع التي ندرسها في الباب الرابع.

وفي هذا الفصل سنقدم مقارنة بين أشهر أساليب نقل هذه الطاقة ، وتحديدًا :

- مقارنة بين نظامي النقل باستخدام التيار المستمر DC ، والتيار المتردد AC
- مقارنة بين استخدام الخطوط الهوائية والأرضية

لكننا سنبدأ بمقدمة صغيرة عن الجهود المستخدمة في شبكات النقل وكيفية اختيارها.

7.1 الجهود المستخدمة في شبكات النقل

تتنوع قيم جهود المستخدمة في شبكات النقل ، لكن السمة العامة أن جهد خطوط النقل يكون عاليًا ، ويبدأ من 66 kV وتصل في بعض البلاد إلى 400 kV كما في السعودية والأردن مثلاً ، وهذه تسمى شبكات الجهد العالي

، أما شبكات الجهد الفائق فتبدأ من

500 kV كما في مصر ، وتصل

حتى 750 kV كما في أمريكا.

Table 7-1 الجهود المستخدمة في شبكات النقل

Name or Category	Nominal Voltage (kV)
Subtransmission	34.5
	46
	69
	115
High voltage	138
	161
	230
	345
EHV	400 (Europe)
	500
	765
Ultra-high voltage	1000 (China)

والجدول 1-7 يعطى تصنيف

الخطوط طبقاً لقيمة الجهد حسب

الـ ANSI Code .

وجهود شبكات النقل في مصر تبدأ

من جهد الـ 66 kV ، وأشهر

مناطقها هي مناطق القاهرة الكبرى

، وهناك بعد ذلك شبكة جهد 132 ك ف وتغطي منطقة الصعيد كلها ، وهناك شبكة جهد الـ 220 ك ف وهذه تغطي شمال الجمهورية لاسيما الدلتا والأسكندرية ومدن القناة ، وترتبط بها أكثر من ثلثى محطات التوليد ، وهناك شبكة الـ 500 ك ف ، وهذه تبدأ من السد العالى بطول 950 كم حتى سيدى كرير بالأسكندرية ، وترتبط بها معظم محطات التوليد الموجودة بأطراف مدينة القاهرة. ويمكن الرجوع للشبكة العامة فى بداية الباب الأول من هذا الكتاب للمزيد.

وبالطبع فإن الهدف من رفع جهد النقل إلى قيم عالية هو:

1- زيادة القدرة المنقولة بين المحطات والتي تتناسب طرديا مع قيمة الجهد فى محطات الموجودة

فى بداية ونهاية الخط.

2- تقليل التيار المار فى الخطوط ، حيث أنه من المعلوم أن القدرة المنقولة هى حاصل ضرب

الجهد فى التيار، فإذا ارتفعت قيمة الجهد فستخفص قيمة التيار عند ثبات قيمة القدرة المنقولة

، وهو ما يترتب عليه عدة فوائد أهمها:

- خفض الفقد فى القدرة المنقولة $(P_{Loss} = 3 I^2 R)$ ،
- استخدام موصلات ذات مساحة مقطع أقل وهذا يعنى سعر أقل ، ووزن أقل ، ويعنى أيضا تكلفة أقل فى بناء الأبراج بالنسبة للخطوط الهوائية.

7.1.1 اختيار جهد النقل

ويتوقف تحديد الجهد المناسب للخط على عاملين أساسيين :

- الأول هو طول الخط.
 - والثانى هو القدرة المنقولة عبر الخط.
- ويمكن استخدام العلاقة الرياضية التالية أو الجدول 2-7 الذى يليها لتحديد أفضل جهد لشبكة النقل.

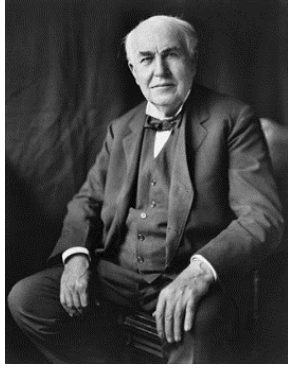
اختيار جهد النقل حسب القدرة والمسافة Table 7-2

$$E = 5.5 \sqrt{\frac{L}{1.6} + \frac{KVA}{150}}$$

القدرة المطلوبة (MW)	المسافة (km)	جهد المطلوب (KV)
3500	500	765
500	400	400
120	150	220
80	50	132

7.2 نبذة عن تطور نقل الطاقة

كانت عملية نقل الكهرباء تتم في بداية توليد الكهرباء عن طريق مد أسلاك توصيل مباشرة بين محطة التوليد (DC Station) ، وبين المشترك كما فعل توماس إديسون (February 11, 1847 – October 18, 1931)



في أول محطة طاقة تجارية في التاريخ والتي أنشأتها شركته في نيويورك سنة 1882 (سميت فيما بعد بشركة جنرال إلكتريك) . لكن مع التوسع العمراني وزيادة الطلب وابتعاد المحطات عن المستهلكين بسبب بناءها خارج المدن وبسبب اتساع المدن فقد تعثرت طريقة نقل الطاقة بالطريقة العادية المباشرة من المحطة للمستهلك وأصبحت غير عملية لأن الهبوط في الجهد الكهربائي الحاصل بسبب طول المسافة أصبح كبيرا .

ابتكرت بعد ذلك طريقة جديدة بواسطة جورج وستنجاس (October 6,

1846 – March 12, 1914) ومعه المهندس الشاب العبقرى نيقولا تسلا (10 July 1856 – 7 January 1943)



الذى يعتبر بحق أبو الكهرباء وهى طريقة رفع الجهد الكهربائي فى المحطة الرئيسية (AC Station) بواسطة المحولات التى استخدمتها تسلا لأول مرة ، ثم نقل الطاقة عبر خطوط الجهد العالي ، ثم فى النهاية خفض الجهد مرة أخرى داخل محطات التحويل القريبة من المستهلكين. وهذه الطريقة حلت مشكلة الفقد فى الطاقة وانخفاض الجهد وذلك بسبب الانخفاض الكبير فى قيمة التيار المار بالخط (نتيجة رفع الجهد) .

7.2.1 مشاكل النقل بنظام الـ AC

لاحقا و مع التوسع فى نقل الطاقة المنقولة بين محطتين ظهرت مشاكل جديدة للـ AC Transmission لم تكن بالحسبان منها :

- 1- أن عملية النقل إذا تمت بنظام الـ AC فسيترتب على ذلك ظهور معاوقات جديدة لمرور التيار (X_L and X_C) تعرف بالـ Inductive and Capacitive Reactance ، وهذه تختلف

عن المقاومة الأومية R المعروفة فى نظام الـ DC ، ويترتب على وجود هذه المعاوقات عدة مشاكل منها زيادة انخفاض الجهد عبر الخط .

2- تبين أن هناك حدودا Limits لأقصى قدرة يمكن نقلها على الخط الواصل بين المحطتين ، وهذه الـ Max power transmitted تتوقف على عدة عوامل منها قيمة جهد الخط فى بدايته ونهايته V_1, V_2 ، وتتوقف أيضا على قيمة معاوقة الخط X ، وتتوقف أيضا على قيمة الـ δ , Power angle بين جهدى المحطتين ، كما فى المعادلة :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

وهذه المعوقات لم تكن موجودة فى نظام الـ DC الذى كانت حدود النقل فيه تتوقف فقط على التحمل الحرارى للخط ، ومن ثم فالقدرة المنقولة قلت لاسيما مع زيادة طول خطوط النقل (زيادة قيمة X) .

3- فى نظام الـ AC يمكن أن يؤثر حدوث أى تغيير فى الحمل أو حدوث عطل على استقرار الشبكة وربما يصل الأمر إلى أن يتسبب فى فصل محطة التوليد . (راجع فصل استقرار الشبكة الكهربائية بالباب السادس من هذا الكتاب) ، ومنه ستجد أن استقرار الشبكة فى نظام الـ AC أصعب بكثير منه فى حالة الـ DC بسبب الـ Reactive Power كما سيتم شرحه فى الباب السادس ونبذة عن ذلك فى نهاية هذا الباب.

4- ظهور ظواهر مثل ظاهرة ارتفاع الجهد عند الأحمال Ferranti Effect ، وكذلك ظاهرة Arcing Ground فى نظم الـ AC المعزولة ، وأيضاً ظاهرة الكورونا وما ترتب على ذلك من كثرة عدد الموصلات بسبب استخدام Bundle conductors كما سنرى ، إلى غير ذلك من المشاكل المرتبطة بنظام الـ AC والتي لم تكن فى الحسبان ، وبالتالي أصبحت تكلفة الموصلات والأبراج متضاعفة مقارنة بنظام الـ DC.

وبعد ظهور هذه المشاكل عادت فكرة النقل باستخدام HVDC تعود مرة أخرى ولكن بعد تعديلها ، أو بمعنى آخر ، بعد دمج الطريقتين معا فى طريقة واحدة تستفيد من ميزاتهما وتتجنب عيوبهما.

7.3 مقارنة بين النقل باستخدام الـ HV-AC باستخدام الـ HV-DC

بالإضافة للنقاط التى ذكرت فى المقطع السابق ، فهناك عناصر أخرى تمثل نقاطا هامة فى المقارنة بين النظامين ، وسنبداً بعرض عيوب نظام الـ HVDC مقارنة بنظام الـ HV-AC ، ثم نعرض لميزاته:

7.3.1 عيوب نظام الـ HV-DC

1- نقل القدرة بالتيار المستمر يتطلب محطة تحويل من التيار المتردد إلى المستمر في بداية خط النقل (Rectifier) ، أخرى للتحويل من التيار المستمر إلى المتردد (Inverter) في نهاية الخط كما في الشكل 1-7 وهذه المحطات لها تكلفة عالية.

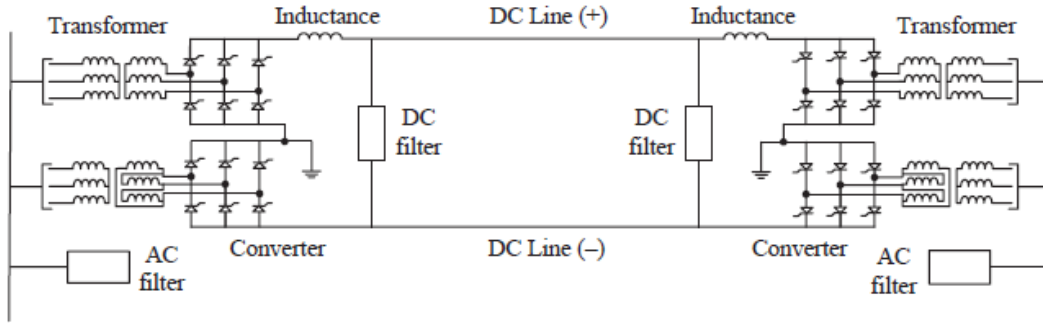


Figure 7-1 منظومة النقل بالجهد العالي المستمر

2- أجهزة الـ Inverters and Rectifiers المستخدمة في نظام الـ DC والتي تظهر صورتها في الشكل 2-7 تعتبر مصدرا للتوافقيات Harmonics غير المرغوب فيها مما يتطلب استخدام harmonic filter عند بداية ونهاية الخط كما في الشكل 1-7 مما يزيد من التكلفة.



Figure 7-2 DC Converter Station

3- من عيوب هذه المحطات أنها تستهلك قدرة غير فعالة بقيمة عالية (لكن مع فارق مهم وهو أن هذه القدرة غير الفعالة تستهلك في بدايات الخط عند المصدر ولا تمر عبر الخط كما في حالة التيار المتردد).

4- القواطع في شبكات HV DC تعتبر أكثر تعقيدا بسبب صعوبة إطفاء القوس الكهربية Arc ، فالتيار المستمر ثابت ولا يمر بالصفري ، لذلك يتم تصميمها بشكل خاص باستخدام ثايرثورات SCRs معينة Gate Turn Off, GTO ، مع دوائر إطفاء Commutation circuits معقدة نسبيا ، أما قواطع شبكات HV AC فإن الأمر سهل لأن التيار المتردد يمر بالصفري مرتين في كل cycle مما يجعل إطفاء القوس الكهربية أكثر سهولة.

5- ومن عيوبها تعقد التصميم والتشغيل والتحكم مقارنة بنظام الـ AC .

7.3.2 مميزات نظام الـ HV-DC

وكل ما سبق يعتبر من عيوب النقل على الجهد العالي المستمر HVDC ، لكن لهذا النظام فوائد عديدة منها:

1- من أهم مميزات هذا النظام أننا لا نحتاج عند الربط بين شبكتين أن نتأكد من أنهما Synchronized كما في حالة الـ AC ، وهذه الميزة مهمة جدا لتحسين الـ Stability ، كما أن هذه الميزة واضحة في شبكتي الصين والهند - وهما أكبر دولتين حدث بهما نمو سريع جدا لشبكة الكهرباء - حيث توسعت الشبكة من خلال إنشاء شبكات موحدة متعددة (Grids) يتم الربط بينها بنظام الـ HVDC لسهولة تبادل الطاقة بين المنظومات المختلفة. راجع شكل 1-6 في الفصل الأول لتجد نموذجا آخر لربط شبكات الولايات المتحدة معا بخطوط HVDC .

2- في نظام الـ DC تكون عدد الأسلاك اثنان Bipolar system فقط كما في الشكل 3-7 الـ DC ، بينما تكون عدد الأسلاك بالدائرة الواحدة يساوي ثلاثة (three phase) في نظام الـ AC كما في الشكل 4-7 ، وهناك أيضا نظام في الـ DC يستخدم خط واحد فقط للنقل Monopolar على أن يعود التيار خلال الأرض. بالتالي ففي كل الأحوال فإن حجم البرج أيضا في نظام الـ DC أصغر ، و هذا يعني تكلفة أقل.



Figure 7-4 Three-phase system



Figure 7-3 HVDC system

3- في نظام الـ DC يكون التردد صفرا ، و بالتالى لا توجد مفاعلة حثية X_L ولا مفاعلة سعوية X_C . وهذا يعنى عدم وجود الـ Reactive Power بمشاكلها (التى تدرس تفصيلا فى نهاية هذا الباب) والتي منها عدم اتزان الجهد ومنها التسبب فى زيادة القدرة المفقودة بسبب مرور هذه القدرة غير الفعالة عبر الخطوط ، ولذلك فقد قلنا سابقا أن استقرار منظومة الـ DC أعلى من استقرار منظومة الـ AC.

4- ظاهرة الـ skin effect موجودة فى حالة التيار المتردد فقط ، حيث يمر التيار المتردد حول السطح الخارجى للموصل أى نقل مساحة المقطع الفعلية التى يمر فيها التيار (مشروحة بالتفصيل فى الفصل العاشر) ، بينما هذه الظاهرة غير موجودة فى حالة التيار المستمر حيث يمر التيار فى كامل مقطع الموصل وهذا يعنى أن مقاومة الموصل فى حالة الـ AC أكبر من مقاومته فى حالة الـ DC (المقاومة تتناسب عكسيا مع مساحة المقطع) وهذا يؤدى بالضرورة إلى أن تكون المفاقد النحاسية ($I^2 R$) فى حالة الـ DC أقل.

5- مساحة مقطع الموصل فى حالة الـ DC أقل من مساحة مقطعه فى حالة الـ AC كنتيجة لظاهرة الـ skin effect ، وهذا يقلل من التكلفة الكلية.

6- فى حالة النقل بالتيار المستمر يكون الهبوط فى الجهد على طول الخط ($I \cdot R$) أقل بكثير من الهبوط فى الجهد فى حالة النقل بالتيار المتردد ($I \cdot (R + jX)$) مما يحسن تنظيم الجهد Voltage Regulation ويزيد من كفاءة نقل القدرة الكهربائية .

7- فى حالة الـ DC يسمح باستخدام خط نقل DC بأى طول لنقل أى قدرة (بشرط عدم تجاوز حد التحميل الحرارى للموصلات فقط) ، بينما فى حالة الـ AC هناك حدود لطول خط النقل كما أشرنا فى مقدمة الفصل.

8- فى خط النقل الـ DC لا نستخدم معوضات Compensators على طول خط مثل Shunt or Series capacitors أو Shunt reactors المستخدمة فى خطوط الـ AC .

9- مفاقد الكورونا Corona Losses في خطوط النقل بالتيار المستمر أقل من نظيراتها في خطوط النقل بالتيار المتردد (راجع الفصل التاسع لشرح هذه الظاهرة).

10- في معظم الحالات تكون قيمة تيار القصر S.C Current في نظام DC أقل بكثير من قيمته في نظام الـ AC لاسيما في حالة الوصلات التي تمر خلال الموانع المائية حيث تكتمل دائرة التيار من خلال مقاومة عالية في حالة القصر فتقل القيمة.

وبالإضافة للميزات السابقة ، هناك ميزات حصرية لنظام الـ HVDC بمعنى أنه لا وجه للمقارنة فيها مع نظام الـ HVAC ، وهي ما نعرضه في الجزء التالي.

7.3.3 متى لا يكون هناك بديل للنقل بنظام الـ HVDC ؟

يعتبر النقل بالتيار المستمر HVDC Transmission اختيارا وحيدا ليس له بديل عند الربط الكهربى بين شبكتين في الحالات الثلاث الآتية :

- 1- عندما يكون تردد الشبكتين مختلفا (50 Hz و 60Hz مثلا)
- 2- عند وجود مائع مائي (بحر مثلا) بين الشبكتين بحيث يمنع تركيب معوضات إستاتيكية (static var compensators) بينهما. ومن أشهر الأمثلة على ذلك الخط البحري بين إنجلترا وفرنسا ، ويصل طوله إلى 45 كم ويحمل 2000 ميغا وات من خلال كابلات HVDC تحت الماء . لاحظ أن النقل هنا لو كان HV-AC لكان هناك مفاقد في التيار هائلة خلال الـ Capacitance الخاصة بالكابل.
- 3- عندما تكون الشبكتين من الضخامة بحيث يصعب على نظم التحكم فيهما عمل synchronization بينهما في حال الفصل والارتباط.

ملحوظة:

في بقية هذا الباب سيكون الاهتمام منصبا فقط على نظام الـ AC بتعديلاته.

7.3.4 مقارنة التكلفة في النظامين

أما بالنسبة للتكلفة ، فتكلفة خط النقل فقط (بالنسبة للكيلو متر الواحد دون أخذ محطات الـ Inverters and Rectifiers في الاعتبار) للتيار المستمر أقل من مثيلتها بالنسبة للتيار المتردد ، لأن التيار المستمر يحتاج إلى موصلات وعوازل أقل وأبراج نقل ذات أبعاد أقل و بالتالى تكلفة أقل . (ملحوظة : تكلفة محولات رفع/ خفض الجهد لا تؤخذ في الاعتبار لأنها موجودة في النظامين).

لكن التكلفة الإجمالية ليست مجرد تكلفة خط النقل ، وإنما هناك معدات خاصة بنظام الـ DC . والمنحنى الموجود فى شكل 5-7 يوضح الفرق بين تكلفة النقل بالتيار المستمر والمتردد مقارنة مع طول خط النقل. لاحظ تغير التكلفة الإنشائية لخط النقل بالتيار المتردد و المستمر مع طول النقل على النحو التالى:

- 1- التكلفة الابتدائية لخط النقل بالتيار المستمر للمسافات الصغيرة أكبر من مثيلتها للتيار المتردد ، لأن تكلفة محطات Inverters/ Rectifications ستتوزع على طول صغير فترتفع القيمة.
- 2- لكن عند قيمة معينة لطول الخط تسمى Break even distance والتي عندها يتقاطع منحنى التكلفة للنظامين نجد أن تكلفة النقل بالتيار المستمر تصبح أقل. وهذه القيمة تكون لطول يساوى 800 كم تقريبا ، لذلك نجد أنه من الناحية الاقتصادية يستحسن النقل بالتيار المستمر فى المسافات الطويلة (أكبر من 800 كم) بينما يفضل إقتصاديا النقل بالتيار المتردد فى المسافات الأقل من 800 كم.
- 3- لاحظ أن معدل تغير تكلفة الخط للكيلو متر الواحد بالنسبة لخط النقل بالتيار المتردد أكبر من مثيلتها بالنسبة للتيار المستمر وذلك بصفة عامة للأسباب التى ذكرناها سابقا .

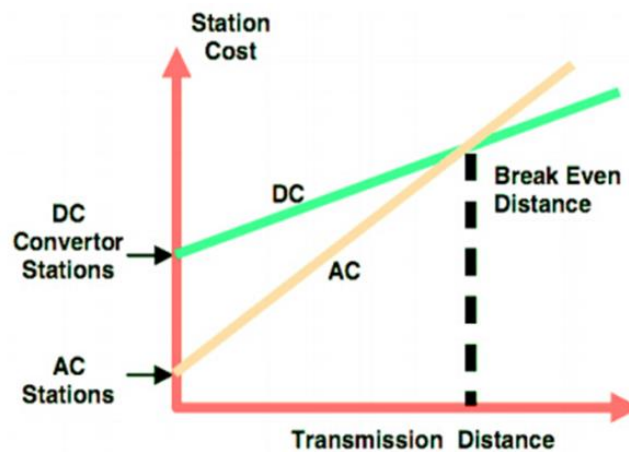


Figure 7-5 مقارنة بين تكلفة النقل فى النظامين

7.4 مقارنة بين خطوط النقل الهوائية والأرضية

يوجد ثلاثة أنواع لخطوط النقل والتوزيع ، هى :

1. خطوط هوائية Over Head Transmission Lines
2. كوابل أرضية Underground Cables.
3. وهناك نوع ثالث غير شائع ، وهو خطوط الـ Gas-Insulated Lines التى تستخدم غاز الـ SF6 كعازل ، وهذه الطريقة لاتزال محدودة الاستخدام وفى المسافات الصغيرة فقط ، وأطول خط نفذ من هذا النوع كان بطول 700 متر فى ألمانيا . ومعظم هذه الخطوط تكون غالبا داخل محطات التوليد أو محطات التحويل أو لنقل الطاقة بينهما لمسافة غير طويلة خلال أنفاق كما فى الشكل 6-7 التى تمثل نموذجا لإحدى محطات شركة سيمنس.



Figure7-6 Gas Insulated Lines

وسيكون التركيز في هذا الجزء على المقارنة بين النوعين الأولين فقط.

في الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات المكشوفة غير المعزولة ، ولذلك تستخدم الأبراج بأنواعها المختلفة لرفع الموصل عن الأرض بمسافة كافية لتوفير الأمان ، ويكون الهواء هو العازل بين الموصلات بعضها البعض على طول مسار الخط ولذلك سميت بالخطوط الهوائية.

ويعتبر استخدام الخطوط الهوائية عموماً أفضل اقتصادياً من الكابلات الأرضية ، حيث تبلغ تكلفة خطوط الكابلات من 5 إلى 10 مرات ضعف تكلفة الخطوط الهوائية ذات الإمكانيات المتساوية . ومن ثم فإن التكاليف الثابتة للخطوط الهوائية (تكاليف الإنشاء) أقل كثيراً من الكابلات الأرضية ، إلا أن التكاليف الجارية لها تكون أكثر قليلاً من التكاليف الجارية للكابلات ، حيث تحتاج الخطوط الهوائية إلى صيانة دورية من نظافة أو تغيير العوازل وترميم القواعد وتغيير بعض أعضاء الهيكل المعدني في حالة تعرضها لعوامل التعرية وكذلك تغيير موصلات مقطوعة أو توصيلها ببعضها بالطرق الفنية السليمة. ورغم ذلك ، فإن مجموع التكاليف الثابتة والمتغيرة للخطوط الهوائية تظل أقل بكثير من مجموعها للكابلات الأرضية .

لكن مما قد يساعد على تفضيل الكابلات أحياناً هو زيادة مساحة الأرض المطلوبة لإنشاء خطوط النقل الهوائية في حالة استخدام الجهود الزائدة والفائقة وارتفاع تكلفة هذه الأراضي ، فعلى سبيل المثال فإن إنشاء خط هوائي للجهد العالي يتطلب 30000 متر مربع/ كيلو متر، وبازدياد ثمن الأرض سوف تزداد تكلفة إنشاء مثل هذه الخطوط.

وأيضاً مما يميز الكابلات المدفونة تحت الأرض عدم تأثرها بالتغيرات الجوية والعوامل الطبيعية كالرياح وتراكم الجليد والتلوث ، وبالتالي يزيد من عمرها الافتراضي عن الخطوط الهوائية . لكن يعيب الكابلات - بالإضافة إلى ارتفاع ثمنها - صعوبة تحديد مكان الخطأ إلا باستخدام السيارات الحديثة المجهزة لذلك.

وعموماً ، فالواقع يقول أن نظم النقل تجدها مختلطة Composite Overhead-Underground Lines ، فحينما يكون من الصعب استخدام الخطوط الهوائية لوجود المناطق السكنية مثلاً فإننا نستخدم الكابلات ، ومن ثم فيمكن أن تجد خطاً مكوناً من جزئين فقط : U/G Cable + OHTL ، وأحياناً نجد مكوناً من ثلاثة أجزاء : U/G Cable + OHTL + U/G Cable .

وتتابع هذا الأمر ستكون بالأساس زيادة في صعوبة تصميم منظومة الحماية ، فالخط الآن ليس له Characteristic Impedance واحدة ، وبالتالي هناك صعوبة في تحديد مسافة العطل سواء باستخدام الـ Distance relay أو باستخدام Travelling Waves .

7.5 المواضيع الهامة في دراسة خطوط النقل

الخلاصة حتى الآن أن عملية نقل الكهرباء تعتبر علماً قائماً بذاته ، وليست كما تبدو للبعض أنها مجرد موصلات تحمل تياراً من مكان لآخر ، وسترى هنا في هذا الباب أننا نحتاج لدراسات تفصيلية لعلاج مشاكل الفقد ومشاكل الاستقرار ، وتحسين انتظام الجهد وغيرها من المشاكل.

ونستطيع في نهاية هذه المقدمة الطويلة أن نوجز هنا أهم المواضيع التي يجب أن يلم بها مهندس القوى الكهربائية والمتعلقة بخطوط النقل مباشرة:

1-العناصر الرئيسية في تركيب الخطوط الهوائية وهذه تدرس في فصلين:

(الفصل الثامن) ، وفيه ندرس:

- الأبراج Transmission towers وأنواعها
- الموصلات conductors وأنواعها والمواد التي تصنع منها
- الملحقات مثل الـ Damping devices وحلقات الكورونا والتأريض وكلامبات الشد ووصلات المنتصف وخلافه.

(الفصل التاسع) ، وفيه ندرس العوازل Insulators وطرق تعليقها وأنواعها وتحسين كفاءتها ، وظاهرة الكورونا إلخ.

2-حسابات الـ TL Parameters ، وهذه تدرس في الفصل الثالث بهذا الباب (الفصل العاشر بالكتاب) ، فكما ذكرنا في المقدمة فإننا نحتاج إلى دراسة حدود نقل القدرة على خط ما ، وحساب ثبات الجهد وغيره ، وكل

هذا يحتاج إلى حساب قيمة معاوقة الخط أو بمعنى أوسع حساب الـ Parameters الخاصة بالخط وهى ثلاثة عناصر:

- حساب قيمة مقاومة الموصل
- حساب قيمة الـ Inductance وتأثيرها على تحميل الخط
- حساب قيمة الـ Capacitance وتأثيرها على الجهد.

وهناك ظواهر متعددة مرتبطة بهذه الـ Parameters مثل ظاهرة الكورونا والـ Arcing Ground وظاهرة Ferranti Effect وغيرها ، وكل هذه الظواهر تدرس أيضا فى هذا الفصل.

3-تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة Reactive Power Compensators وهى من الموضوعات الهامة لدراسة التحكم فى القدرة المنقولة بالخط وكذلك المساعدة فى تحسين جهد الشبكة ، وهو ما يطلق عليه خطوط النقل المرنة Flexible AC Transmission systems أو اختصارا كلمة FACTs ، وهذه تدرس فى الفصل الأخير من هذا الباب (الفصل الحادى عشر).



الأبراج الهوائية لنقل القوى

8.1 تصميم الأبراج

الوظيفة الرئيسية لخطوط النقل الكهربائية هي نقل القدرة الكهربائية من مكان إلى آخر. والمكون الرئيسي لخط النقل الهوائي هو الموصل أما باقي الأجزاء فهي أجزاء مساعدة لحمل الموصل وعزله عن الأرض. وفي الخطوط الهوائية يستفاد من الهواء كوسط عازل، ولكن الهواء - شأن كل العوازل - ينكسر عزله إذا زاد الجهد عن قيمة معينة، وهي في حالة الهواء تساوي 30 kV/cm ، بمعنى أنه إذا وصل الجهد بين نقطتين إلى أكثر من هذه القيمة فسيتحول الهواء إلى موصل. ولذا كان الغرض من استخدام الأبراج الكهربائية هو الحفاظ على الموصلات على ارتفاع آمن من الأرض وكذلك إيجاد مسافة آمنة بينها وبين بعضها البعض.

وتتعدد العوامل التي تؤثر في تصميم الأبراج الكهربائية، فمن أهمها:

- 1- الجهد الكهربى المستخدم
- 2- عدد الدوائر التي يحملها البرج.
- 3- المسافة بين الأبراج.
- 4- العوامل المناخية التي يتعرض لها الخط (رياح - ثلوج.....).
- 5- أقطار الموصلات والمسافة بينها.
- 6- العوامل الجغرافية (طبيعة الأرض، إلخ)

في المراجع الأجنبية ستجد أن البرج إما أن يسمى Tower أو يسمى Pylons، وهذا الاسم الأخير مأخوذ من شكل وطريقة تصنيع البرج والذي يصنع غالبا من تشيكلات حديدية متداخلة (بعض الأبراج تصنع من الخرسانة أو حتى الخشب في الجهود المنخفضة نسبيا).

ورغم أن معظم ارتفاعات الأبراج تتراوح بين 15 - 50 متر تقريبا، إلا أن هناك حالات خاصة معدودة على مستوى العالم يصل فيها ارتفاع البرج إلى مئات الأمتار (أعلى برج وصل إلى 370 متر وموجود في الصين).

وأعلى برجين في مصر (221 متر) موجودان ضمن خط النقل الهوائي الذى يعبر قناة السويس، وبالطبع فالهدف منهما تقادى السفن الضخمة التى تعبر القناة. وهذه إحصائية ببعض أشهر هذه الأبراج حول العالم.

Tower	Year	Country	Town	Pinnacle	Remarks
Zhoushan Island Overhead Powerline Tie	2009–2010	China	Damao Island	370 m	Tallest pylons in the world
Nanjing Yangtze River Crossing	1992	China	Nanjing	257 m	Tallest reinforced concrete pylons in the world
HVDC Yangtze River Crossing Wuhu	2003	China	Wuhu	229 m	Tallest electricity pylons used for HVDC
Elbe Crossing 2	1976–1978	Germany	Stade	227 m	Tallest electricity pylons in Europe
Chushi Powerline Crossing	1962	Japan	Takehara	226 m	Tallest electricity pylons in Japan
Overhead line crossing Suez Canal	1998	Egypt		221 m	
Bosporus overhead line crossing III	1999	Turkey	Istanbul	160 m	

Tower	Year	Country	Town	Pinnacle	Remarks
Pylons of Ghesm Crossing	1984	Iran	Strait of Ghesm	130 m	One pylon standing on a caisson in the sea
Carquinez Strait Powerline Crossing	1901	United States	Benicia	68 m + 20 m	World's first powerline crossing of a larger waterway

8.1.1 عناصر مكونات الأبراج

يتكون أى خط هوائى (شكل 8-1) من ثلاثة عناصر أساسية هى:

- 1- الأبراج Tower وما تشتمل عليه من قواعد ونظم تأريض.
- 2- العوازل insulators
- 3- الموصلات

بالإضافة إلى عدد من الملحقات مثل:

- خط الأرضى Earthing Line ويسمى أيضا Shield conductors للحماية من الصواعق البرقية
- خامدات الاهتزاز Dampers
- فواصل الأسلاك Spacer فى حالة استخدام نظام الـ Bundle Conductors
- الحلقات المعدنية Guarding Rings ، وغيرها.

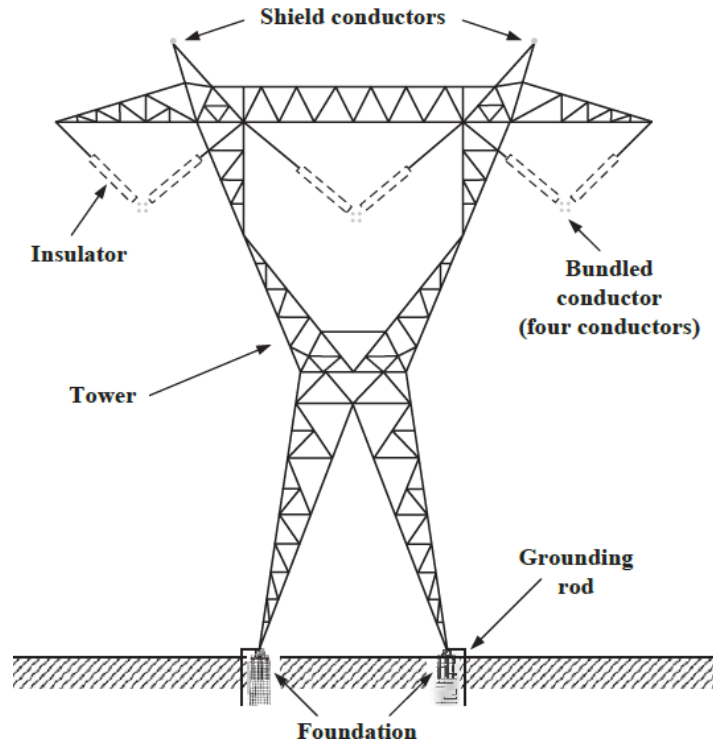


Figure 8-1 مكونات البرج

علما بأن كل برج لابد له من لوحة تعريفية تحمل رقمه (كل برج له رقم خاص لتسهيل عمليات الصيانة أو البحث عن الأعطال).

والمكونات السابقة وغيرها ستشرح هنا في هذا الباب ضمن ثلاثة فصول :

- هنا في الفصل الثامن سنعرض شرحا تفصيليا للأبراج والموصلات وملحقاتها.
- أما الفصل التاسع سنخصصه للعوازل في الأبراج .
- في الفصل العاشر سندرس كيفية عمل تمثيل Simulation لهذه الخطوط الهوائية وكيفية حساب قيم عناصرها (Resistance, Inductance and Capacitance) ، وندرس أيضا تأثير هذه القيم على أداء خط نقل الطاقة عموما ، وندرس أيضا بعض الظواهر المرتبطة بهذه الـ Parameters مثل ظاهرة الـ Ferranti Effect ، الـ Arcing Ground ، وظواهر الارتفاع في الجهد.

8.2 المسافات فى الأبراج الكهربائية

يمكن أن يحمل البرج الكهربى دائرة كهربية واحدة (الدائرة الواحدة تحمل موصلات لثلاثة أوجه three phases) ، ويمكن أيضا أن يحمل دائرتين. ويجب أن يراعى عند تصميم الأبراج وجود مسافات آمنة بين الموصلات والأرض ، وكذلك بين الموصلات وبعضها البعض ، وهو الهدف الأساسى من استخدام البرج. وهناك عدة مسافات تحتاج للتوصيف عند دراسة الأبراج منها:

- 1- ارتفاع البرج ، والمسافة بين الموصلات والأرض
- 2- المسافة بين كل برج والبرج الذى يليه
- 3- مسافة حق طريق المرور Right of Way
- 4- تقدير المسافات الآمنة من تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية

وفيما يلى ندرس تفصيلا هذه الموضوعات.

8.2.1 ارتفاع البرج والمسافة بين الموصلات والأرض

ارتفاع الأبراج تتراوح غالبا بين 15 – 50 متر (باستثناء الأبراج الخاصة التى أشرنا إليها) ، وبالطبع فالعنصر الأساسى فى المقارنة هو قيمة الجهد.

أما الحد الأدنى للمسافة بين الموصلات والأرض فهو يحسب كما يلى :

CLEARANCE ABOVE GROUNDS:

(Clause 77 of Indian Electricity Rules)--- m.

33 KV -----	5.100
66 KV -----	5.490
132 KV-----	6.100
220 KV -----	7.015
400 KV-----	8.840

ويمكن حسابها أيضا من بعض المعادلات ، وبالطبع ستتوقف المسافة على الجهد بالدرجة الأولى وأيضا على مقدار الـ Sag المسموح به حتى لا تتلامس الموصلات وقت هبوب الريح. وبعض المعادلات تأخذ مقطع الموصل فى الحسبان . وجدول 1-8 يقدم بعض نماذج لهذه الـ Formulas التى تستخدم فى تحديد هذه المسافات:

Table 8-1

1) Mecomb's formula	V= Voltage of system in KV D= Diameter of Conductor in cm S= Sag in cm W= weight of conductor in Kg/m
$Spacing(cm) = 0.3048 \cdot V + 4.010 \frac{D}{W} \sqrt{S}$	
2) VDE formula	Where- V= Voltage of system in KV S= Sag in cm
$Spacing(cm) = 7.5\sqrt{S} + \frac{V^2}{2000}$	
□ Swedish formula	Where- E= Line Voltage in KV S= Sag in cm
$Spacing(cm) = 6.5\sqrt{S} + 0.7 \cdot E$	
□ French formula	Where- E= Line Voltage in KV S= Sag in cm L= length of insulating string(cm)
$Spacing(cm) = 8.0\sqrt{S+L} + \frac{E}{1.5}$	

8.2.2 المسافة بين البرج والذي يليه

المسافة المثلى (Span) بين أبراج الجهد العالي الهوائية هي المسافة التي تعطي أقل تكلفة للخط مع توفير حدود الأمان المطلوبة. وتجري هذه الحسابات لكل كيلومتر بعد تحديد هل الخط (مفرد أم مزدوج) وهل سيوضع في أرض عادية ومنبسطة أم على أرض ذات تربة صخرية مثلاً ، ثم تحديد بعض المعطيات مثل قوة شد الموصلات في أدنى درجة حرارة لها، و تدلي هذه الموصلات Sag في أعلى درجة حرارة لها، ، ويؤخذ في الاعتبار أيضا ارتفاع الأبراج وطول سلاسل عوازل التعليق بالإضافة لحجم وتكاليف القواعد الخرسانية للأبراج والتأريض.

وعادة تجري الحسابات باعتبار المسافة هي 100متر مثلاً بين كل برجين ، ثم تزيد تدريجياً حتى 500 متر ثم نختار المسافة التي تعطي أقل تكلفة . وبالمطبع تجري هذه الحسابات بواسطة برامج خاصة للحصول على النتائج بسرعة.

8.2.3 مسافة طريق مرور الأبراج Right of Way

يجب أن يراعى وجود مسافة مناسبة Right of Way لتباعد المباني والأشجار عن مسار الخطوط (شكل 8-2) . وتحسب هذه المسافة بحيث إذا سقطت إحدى الأشجار لأي سبب من الأسباب فإنها لا تسقط على الخطوط ، وهذا يستلزم تقدير الطول الأقصى الذي يصل إليه طول الشجرة.



Figure 8-2 Right of Way

كما أن الخطوط يجب أن تكون أعلى من مستوى السيارات المارة تحتها لاسيما سيارات النقل حتى لا يتسبب انخفاضها في حوادث كما في الشكل 8-3.



Figure 8-3

علما بأنه في حالة حدوث حادثة كما في الصورة السابقة فسيكون نتاجها أن تنفجر جميع إطارات السيارة كما في الشكل 8-4 (بسبب ارتفاع فرق الجهد على الهواء الداخلي للإطار) ، والمفارقة الغريبة هنا أن الشخص الموجود بداخل السيارة لن يصاب بأذى حتى لو كان جهد الخط 500 ك ف ، والسبب هو عدم وجود فرق جهد عليه وهو داخل السيارة ، وهو في ذلك يشبه الطيور التي تقف على خطوط النقل ولا تتأثر بسبب عدم وجود فرق جهد على جسمها. (تذكر أن التيار لا يسير إلا بين نقطتين بينهما فرق للجهد.)



Figure 8-4 السيارة بعد اصطدامها بخط مكهرب

وإنما الخطر الداهم يحدث إذا غادر هذا الشخص السيارة ووقف على الأرض مثلاً ثم أغلق باب السيارة ، عندها سيكون هناك فرق جهد على جسمه كاف لحرقه وليس فقط موته. وعلى أى انسان فى المنطقة المحيطة بالسيارة أن يقف على بعد لا يقل عن 10 متر ، فإذا كان لابد أن يكون على مسافة أقل من ذلك فعليه أن تكون قدميه متجاورتين وملامستين حتى يتجنب ظهور Step Voltage على جسمه.



Figure 8-5 الطريقة المثلى للهروب

فإذا أراد الشخص مغادرة السيارة فلا يلمس أى جزء منها بعد مغادرته للسيارة ، ويجب أن تكون قدميه متجاورتين كما فى الشكل 5-8.

8.2.4 تحديد مدى مسافات خطورة المجالات حول الأبراج

تتميز خطوط القوى الكهربائية بأن حولها مجالات كهربية ومغناطيسية (شكل 6-8 وشكل 7-8). وتتوقف شدة وخطورة المجال الكهربى على شدة الجهد ، بينما تتوقف شدة المجال المغناطيسى على شدة التيار .

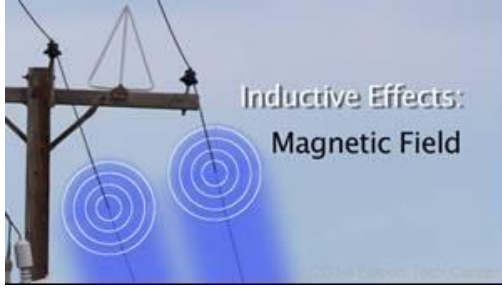


Figure 8-7

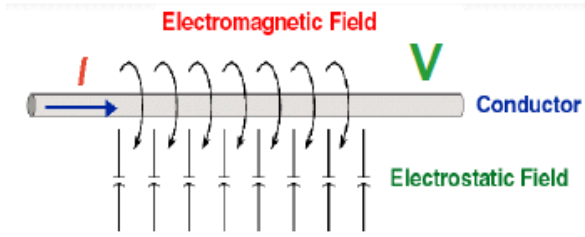


Figure 8-6

وتتوقف شدة المجال أيضا على مدى البعد عن الخط ، فعلى سبيل المثال في خط 400 ك ف كما في الشكل 8-8 حيث تكون شدة المجال المغناطيسي أسفل الخط مباشرة حوالي $15 \mu T$ بينما تصل إلى $1 \mu T$ على بعد 60 متر من الخط.

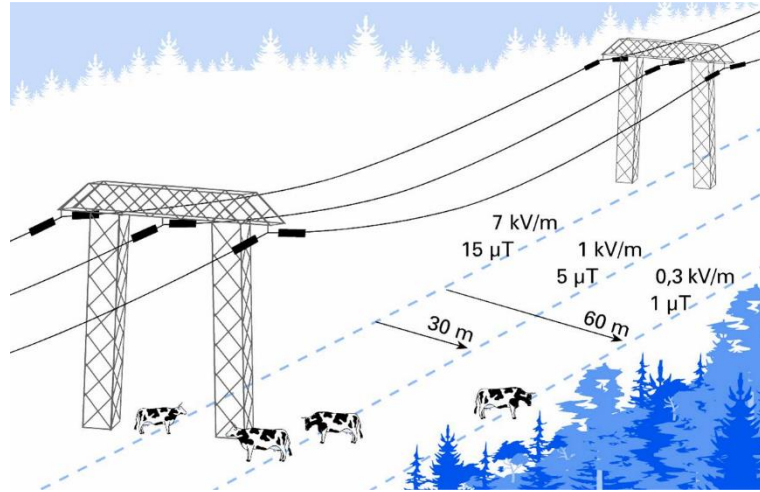


Figure 8-8 شدة المجالات الكهربائية والمغناطيسية قرب خط نقل

أما المجال الكهربائي فتتراوح قيمته في المثال السابق بين 0.3 kV/m إلى 7 kV/m .

ورغم أن الأبحاث متضاربة نوعا ما في تقدير المسافة التي خلالها يتسبب المجال الكهربائي والمغناطيسي في ظهور خطر على صحة الإنسان والحيوان ، إلا أن هناك بعض القيم لا خلاف عليها وهي:

- أقل من متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر خطرا أكيدا
- أكثر من 10 متر لكل 100 كيلو فولت يعتبر آمنا أكيدا

وبين هاتين القيمتين توجد منطقة البعض يتشدد فيها والبعض يتساهل ، وفي أغلب الأحوال تعتبر مسافة متر لكل 10 كيلوفولت مسافة مناسبة. بالطبع المقصود هنا عند دراسة خطورة هذه المجالات على شخص دائم

التواجد في هذه المنطقة (طبيعة عمله أو سكنه تقتضى أن يقضى وقتا طويلا بجوار هذه الخطوط)، ولا نقصد تأثيرها على شخص يمر مروراً عابراً .

وفيما يلي نموذج للمواصفات الهندية للمسافات المختلفة في خطوط النقل الهوائية

LINE CLEARANCES

The minimum clearances shall be in accordance with Indian Electricity Rules, 1956 and are given in Table I.

Table - I, Minimum Clearance (Values in Meters)

Voltage Category (IE Rules, 1956) Nominal System - Voltage Clearance	Low & Medium Voltage			High Voltage			Extra High Voltage		
	Low	Upto 11 KV	Upto 33 KV	66 KV	132 KV	220 KV	400 KV HVDC	±500 KV	800 KV
1) Clearance to Ground									
(a) Across Street	5.8	6.1	6.1	6.1	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(b) Along Street	5.5	5.6	5.8	6.1	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(c) Other areas Bore Cond.	4.6	4.6	5.2	5.5	6.1	7.0	8.80	12.50	12.40
(d) Other areas Insu. cond.	4.0	4.0	-	-	-	-	-	-	-
2) Clearance to Buildings									
(a) Vertical (*) - from higher object	2.5	3.7	3.7	4.0	4.6	5.5	7.30	11.59	10.50
(b) Horizontal (+) - from nearest point.	1.129	1.219	2.0	2.3	2.9	3.80	5.6	10.98	9.20

3) Clearance Between Line crossing each other.

Voltage of 1 st Line	Voltage of 2 nd Line						
	250V to 66KV	100 KV	132 KV	220 KV	400 KV	± 500KV HVDC	800 KV
250 V to 66 KV	2.44	2.75	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
100 KV	2.75	2.75	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
132 KV	3.05	3.05	3.05	4.58	5.49	6.86	7.94
220 KV	4.58	4.58	4.58	4.58	5.49	6.86	7.94
400 KV	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	6.86	7.94
+ 500 KV HVDC	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	7.94
800 KV	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94

4) Clearance from Supporting structure of another line

- (i) Low or Medium Voltage line 1.210 meters
- (ii) High Voltage 1.829 meters.
- (iii) Extra High Voltages lines 1.944 meters.

5) The Transmission line corridor requirement for different voltage lines are as follows :

Voltage Level (KV)	Corridor Requirement (meters)	Voltage Level (KV)	Corridor Requirement (meters)
66	18	220	35
110/100	22	500 HVDC	52
132	27	800	85

6) Tree Clearance :

- i. For E.H.V.T Lines , all tall trees within 12.19 meters on either side.
- ii. All bush growth within 6,095 meters on either side to be completely cleared, Grafted fruit trees which will not grow tall may be left out.
- iii. All branches or leaves which are within 0.914 meters from the conductors, neutral and earth wires in case of L.T line should be cut.

8.3 أنواع الأبراج :

تصنع الأبراج الكهربائية في الجهود العالية عادة من الصلب المجلفن Galvanized Steel. ويتحدد نوع البرج من طريقة تركيب العازل المركب عليه أو الوظيفة التي يؤديها ، فإذا كان العازل معلقا يصبح نوع البرج برج تعليق و إذا كان العازل مشدودا يصبح نوع البرج برج شد ، كما أن البرج الذي يعبر مانع مائي مثلا يسمى برج عبور ، وهكذا.

8.3.1 أبراج تعليق Suspension Towers :

وتشكل هذه الأبراج حوالي 80 % من إجمالي عدد الأبراج في الخط وتستخدم في حمل الموصلات .
وهي الأبراج التي يتم توظيفها لحمل الموصل فقط و لا يقع عليها أى قوى شد أفقية. فأبراج التعليق (شكل 8-9) تعتمد في ثباتها على وجود قوتين للشد متساويتين على جانبي البرج فلو حدث و سقط موصل من إحدى الجهتين فسيؤثر الموصل وكذلك الموصلات على كافة أبراج التعليق المجاورة.

ويمكن تمييز هذا النوع بوجود سلسلة عوازل واحدة لكل موصل عند كل نقطة تعليق كما في الصورة على عكس الأنواع التالية. و لتجنب إمتداد هذه المشكلة فإننا نستخدم برج شد بعد كل عشرة أبراج تعليق تقريبا.



Figure 8-9 برج تعليق

8.3.2 أبراج شد Tension Towers :

وظيفة أبراج الشد هي تحمل قوى الشد الميكانيكية بصورة مستقلة عن الأبراج السابقة أو اللاحقة.



برج شد 8-10 Figure

ويمكن تمييز هذا البرج (شكل 8-10) بوجود سلسلتين للعوازل عند كل نقطة تثبيت حيث يكون الموصل بينه وبين البرج الذي يسبقه مربوطاً بأحد العازلين والموصل بينه وبين البرج الذي يليه مربوطاً بالعازل الثاني .

ويوضع برج من هذا النوع بعد كل عدة أبراج تعليق - كل عشرة أبراج في المتوسط - وذلك لتفادي سقوط السلك من على كل الأبراج حالة حدوث قطع فيه ، لأنه إذا كانت جميع الأبراج على مسار الخط أبراج تعليق ، وحدث قطع في الموصل فإن الموصل سيسقط من على جميع الأبراج ، وبالتالي سنحتاج لوقت ومجهود كبير وتكلفة عالية للإصلاح.

وأبراج الشد متعددة الأنواع حسب نوع قوى الشد الواقعة عليها كأبراج الشد في بداية الخط و نهايته ، أو الأبراج المستخدمة عند تغيير الاتجاه ، أو أبراج عبور المسطحات المائية الصغيرة كالأنهار أو قناة السويس مثلا .

8.3.3 أبراج التبديل Transposition Towers :

وهذه الأبراج (شكل 8-11) يتم من خلالها تبديل الفازات على مسافات متساوية بطول الخط لكي تتساوى الـ Inductance في الفازات الثلاثة وكذلك تتساوى الـ Capacitance للفازات الثلاثة بطول الخط

فكما سنرى في الفصل العاشر فإن قيمة الـ Inductance and Capacitance تتوقف على أبعاد البرج وارتفاعات الموصلات عن الأرض ، وهذا يعني أن الـ Phase العلوى ستكون له Inductance مختلفة في القيمة عن الـ Phase السفلى ، ومن هنا ظهرت الحاجة لتبديل الفازات على طول الخط ، بحيث يكون Phase-A مثلا في الأعلى لثلث المسافة ، ثم يكون في الوسط في الثلث الثاني ، ثم في الأسفل في الثلث الأخير .

مع ملاحظة إنه يجب ألا يختلف ترتيب الفازات في بداية الخط عن نهايته بعد إجراء عملية التبادل ، على سبيل المثال لو كان الخط طوله 150 كم فيتم تقسيم هذا الخط إلى ثلاثة قطاعات أو مضاعفاتها بحيث يتم تركيب برج تبادل كل 50 كم من الخط. ويكون Phase-R هو الأعلى في البداية والأوسط في المنتصف والأسفل في النهاية ، ومن ثم يكون هو أيضا الأعلى بعد نهاية الـ 150 كم إذا زاد الطول عن ذلك. وبالتبع فإن برج التبادل هو بالضرورة برج شد .



Figure 8-11 برج تبادل

8.4 الموصلات فى أبراج الجهد العالي :

الموصل هو الجزء الرئيسي في خط النقل حيث إنه هو الناقل الذي يقوم بنقل الطاقة الكهربائية من مكان لآخر. والموصلات المستخدمة في خطوط النقل تكون مكشوفة أي غير مغطاة بمادة عازلة ، وتكون معلقة بين أعمدة أو أبراج تبعد عن بعضها مسافات قد تصل في بعض الأحيان أكثر من 250 متراً ، وهذه المسافة تعرف ببحر السلك أو الـ "Span" .

وتصنع الموصلات من النحاس أو الألمونيوم النقي بدرجة نقاوة لا تقل عن 99.5 % . ويتم سحب الأسلاك النحاسية إما على الساخن أو على البارد ، أما أسلاك الألمونيوم فيتم سحبها على البارد فقط لأن السحب على البارد يعطى قوة شد أعلى.

وكون الموصل معلقاً يجعله دائماً واقعاً تحت تأثير وزنه الذي يؤثر رأسياً إلى أسفل مسبباً إجهاد شد في الموصل ، ولذلك فإنه يجب أن تكون المادة التي يصنع منها الموصل ذات متانة ميكانيكية عالية تجعلها تتحمل الإجهاد

الواقع عليها ، ويجب أن تكون خفيفة الوزن حتي تكون قوة الشد المؤثرة على الموصل قليلة وحتى يمكن زيادة المسافة بين الأبراج لتقليل تكلفة إنشاء الخط .

وعموماً فإن اختيار مادة الموصل في خطوط النقل يخضع لعدة اعتبارات:

1. المسافة بين البرجين.
2. الشد في الموصلات.
3. هل يكون الخط معرض للاهتزازات نتيجة الرياح أم لا.
4. الفقد في القدرة على الخط.
5. الهبوط في الجهد على الخط.
6. الطقس والعوامل المناخية في موقع الخط.
7. مساحة مقطع الموصل أو حجم الموصل.

8.4.1 خصائص المواد المستعملة في صناعة الموصلات

1- التوصيلية: Conductivity

يجب أن تكون المادة التي تصنع منها موصلات خط النقل ذات موصلية عالية وذلك حتى يكون الفقد في القدرة على الخط أقل ما يمكن حتى تكون عملية النقل اقتصادية.

2- المتانة الميكانيكية: Mechanical Strength

تقاس المتانة الميكانيكية بأقصى إجهاد تتحمله المادة ، وكلما كانت نسبة المتانة إلى الوزن أكبر كلما أمكن زيادة خطوة البرج وتقليل تكلفة إنشاء الخط.

3- معامل المرونة: Modulus of Elasticity

استطالة الموصل تحت تأثير إجهاد الشد الواقع عليه تؤدي إلى نقص مساحة المقطع مما يؤدي إلى ضعف الموصل وانقطاعه ولذا نحتاج أن يكون معامل المرونة صغيراً.

4- معامل التمدد الحراري: Heat expansion coefficient

يفضل صناعة الموصل من مادة ذات معامل تمدد حراري صغير حيث أن خطوط النقل الهوائية تكون معرضة للتغيرات المناخية نظراً لوجودها بالعراء فهي عرضة للتغيرات في درجة الحرارة من درجات تقترب من درجة التجمد في الشتاء إلى درجات تربعو على 40 درجة مئوية وقد تصل إلى درجة 50 أو أكثر في بعض المناطق ، فإذا كان معامل التمدد الحراري للموصل كبيراً فإن أسلاك خط النقل ستمدد لدرجة تجعلها تقترب من الأرض في الصيف أو على الأقل تزداد احتمالية تلامسها ببعضها ، في حين أنها ستتكمش انكماشاً شديداً في الشتاء مما يزيد الشد في الموصل ويجعله ينقطع.

5- التكلفة: Cost

والتكلفة من أهم العوامل المؤثرة في اختيار مادة الموصل ، وبالطبع نهدف إلى جعل تكلفة نقل الطاقة الكهربائية أقل ما يمكن .

والمادة الأكثر استعمالاً في صناعة موصلات خطوط النقل الهوائي هي الألمونيوم حيث أن الألمونيوم يتمتع بخصائص تؤهله لأن يكون بديلاً جيداً للنحاس وهي أن له موصلية عالية تقارب 60% من موصلية النحاس إضافة إلى خفة الوزن ورخص الثمن . ورغم أن المتانة الميكانيكية للألمونيوم أقل من النحاس فإنه يتم التغلب عليها بطرق مختلفة كما سنرى في الجزء التالي.

8.5 أنواع الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائي

8.5.1 الموصلات المجدولة (Stranded Conductors) :

معظم الموصلات المستخدمة في خطوط النقل الهوائية تكون عبارة عن جديلة من أسلاك الألمونيوم ملفوفة فوق سلك صلب واحد أو أكثر في قلب الجديلة ، ويمكن أن تكون أسلاك الألمونيوم عبارة عن طبقة أو أكثر من الأسلاك المجدولة بطريقة حلزونية حول هذا القلب (شكل 8-12) ، ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفاً لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة لزيادة متانة الشد.



Figure 8-12 موصلات هوائية مجدولة

والموصلات المجدولة تستخدم في الأحمال المرتفعة والجهود العالية لأنها تتحمل تيارات أعلى لنفس مساحة مقطع الموصل وذلك بسبب خاصية الـ skin effect حيث يمر التيار في الطبقات الخارجية للسلك بنسبة أكبر في الموصلات المجدولة ، بسبب تعدد الأسطح ، ومع زيادة عدد الأسطح تزداد فرصة مرور التيار بقيمة أكبر بينما في الموصل المصمت لدينا سطح واحد.

وبالتالي فإن الموصل المجدول يتحمل تيارا كهربيا أعلى من الموصل المصمت لنفس مساحة المقطع في حالة التيار المتردد ، بالإضافة إلى أنه يمتاز بالمرونة العالية .

ولكن هناك عيبين للموصلات المجدولة :

- الأول أن القطر الخارجي للموصلات المجدولة أكبر من القطر الخارجي للموصلات المصمتة والتي لها نفس المساحة.
- والثاني هو عدم انتظام توزيع الـ Electric Field على سطحه مما يؤدي لزيادة المجال في مواضع أكثر من الأخرى كما سيتم شرحه في باب الكابلات عند الحديث عن موصلات الكابلات حيث أن تأثير عدم انتظام المجال يكون واضحا جدا في الكابلات أكثر من الخطوط الهوائية.

وهناك أنواع متعددة من الموصلات المجدولة المستخدمة في الخطوط الهوائية منها:

- Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR),
- All-Aluminum Conductor (AAC),
- All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC),
- Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS),
- Aluminum Conductor Composite Core (ACCC),
- Aluminum Conductor Composite Reinforced (ACCR), and

وفيما يلي شرح لبعض من هذه الأنواع.

8.5.2 موصلات الألمونيوم الخالص

يعتبر الـ All Aluminum Conductor, AAC أرخص أنواع الموصلات ، ولكن بسبب المتانة المنخفضة لهذا النوع من الموصلات تجعله مناسباً فقط عندما تكون المسافة بين كل برجين قصيرة.

8.5.3 الألمونيوم المقوي بالصلب:

يتكون الـ Aluminum Conductor Steel Reinforced ACSR من قلب عبارة عن طبقة أو أكثر من أسلاك الصلب المجلفن المحاطة بطبقة أو أكثر من أسلاك الألمونيوم ، كما هو موضح بالشكل 8-13، ويتم تعريف هذه الموصلات بعدد أسلاك الألمونيوم وأسلاك الصلب . على سبيل المثال السلك مقطع 30 / 7 أي التي تتكون من 30 سلك ألمونيوم على طبقات (طبقتين في الرسم) ، و 7 أسلاك من الصلب إلا أنه توجد أنواع كثيرة بنسب مختلفة من أسلاك الصلب والألمونيوم . كما في الجدول التالي المأخوذ من شركة كابلات عمان. وبالطبع هناك مقاييس أخرى يرجع إليها في الكatalogات.



OVERHEAD LINE CONDUCTORS

ALL-ALUMINIUM CONDUCTORS

AAC

BS 215 : Part 1

TABLE 1A

BRITISH SIZES

Code Name	Nominal Area	No. / Nominal diameter of wires	Approximate Overall Diameter	Total Area	Approximate Weight	Nominal Breaking Load	Nominal DC Resistance at 20°C	Current Rating (*)
	mm ²	No./mm	mm	mm ²	kg/km	KN	ohm/km	A
Midge	22	7/2.06	6.18	23.33	64	3.99	1.22700	106
Ant	50	7/3.10	9.30	52.83	145	8.28	0.54190	175
Fly	60	7/3.40	10.20	63.55	174	9.90	0.45050	196
Wasp	100	7/4.39	13.17	106.00	290	16.00	0.27020	268
Hornet	150	19/3.25	16.25	157.60	434	25.70	0.18250	342
Chafer	200	19/3.78	18.90	213.20	587	32.40	0.13490	412
Cockroach	250	19/4.22	21.10	265.70	731	40.40	0.10830	471
Butterfly	300	19/4.65	23.25	322.70	888	48.75	0.08916	530
Centipede	400	37/3.78	26.46	415.20	1145	63.10	0.06944	616

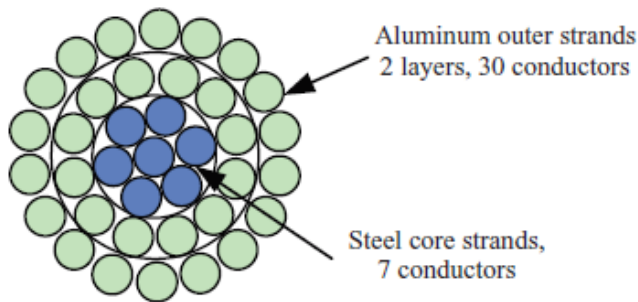


Figure 8-13 ACSR size 30/7

هذا النوع من الموصلات له متانة أعلى من موصلات الألمنيوم ولذلك يستخدم عندما تكون المسافة بين الأبراج كبيرة ويمكنه كذلك تحمل الظروف الجوية السيئة وله كذلك معامل مرونة أعلى ومعامل تمدد حراري أقل من

الألومنيوم ولذلك فإن خصائصه الميكانيكية أعلى بكثير من الألومنيوم ويمكن التحكم في هذه الخصائص بتغيير نسبة الألومنيوم إلى الصلب في الموصل المجدول.

8.5.4 موصلات سبائك الألومنيوم

وهذا النوع : AAAC , All Aluminum Alloy Conductor عبارة عن سبيكة متجانسة معالجة حرارياً من الألومنيوم والمغنسيوم والسيليكون ، وهذا الموصل له خصائص تميزه عن ACSR ، AAC حيث أن له متانة عالية جداً وذلك يتيح زيادة المسافة بين الأبراج وبالتالي تقليل تكلفة إنشاء الخط أو زيادة قدرة حمل التيار عند استخدامه على الأبراج الموجودة فعلاً وتحسين أداء الخط . وهذا الموصل له مقاومة كهربية أقل وبالتالي يسبب فقد أقل في القدرة على الخط ، ولذلك يكثر استخدام هذا النوع من الموصلات في الخطوط الحديثة .

8.5.5 الألومنيوم المقوي بسبيكة الألومنيوم

يعتبر : Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR مشابه تماماً لـ ACSR ولكن مع استبدال القلب المكون من أسلاك الصلب بأسلاك من سبيكة الألومنيوم وبذلك يعطي خصائص بين خصائص موصلات الألومنيوم وخصائص موصلات الألومنيوم المقوي بالصلب.

8.5.6 سبيكة الألومنيوم المقوي بالصلب:

يعتبر AACSR Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced مشابه لـ ACSR حيث يحتوي على قلب مكون من أسلاك الصلب ولكن تستبدل أسلاك الألومنيوم بأسلاك من سبيكة الألومنيوم ، وهذا النوع له متانة ميكانيكية عالية على حساب الموصلية ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات عندما تكون مثل هذه الخصائص مرغوبة وخصوصاً في أسلاك الأرضي.

8.5.7 أطوال الموصلات

عادة يكون الموصل ملفوفاً على بكرة (درم) بطول يتراوح بين 1 كيلومتر (موصلات Moose or Zebra) وقد تصل إلى 2 كيلومتر كما في موصلات من النوع Panther أو موصلات التأسيس ، وبالطبع سنحتاج لعمل وصلات بين الموصلات كما في الشكل 8-14 ، وذلك للوصول للطول اللازم .ويمكن عمل الوصلات بصور أخرى مثل اللحام وغيره.



Figure 8-14 وصلات الربط

8.6 الاكسسوارات ACCESSORIES التى تستخدم فى الخطوط

هناك أيضا بعض العناصر التى يمكن تصنيفها على أنها ملحقات تتعلق بالموصلات ، مثل كلامبات التعليق والشد ، ومنها أيضا خامد الاهتزازات Dampers ، ومنها كذلك الـ (spacers) وهى الفواصل بين الموصلات عند عمل Bundles Conductors.

وفيما يلى بعض التفاصيل عن هذه الملحقات.

8.6.1 فواصل الموصلات

عند عمل Bundle Conductors ، يمكن استخدام موصلين أو ثلاثة أو أربعة لكل فاز كما فى الشكل 8-15 ، وبالطبع نحتاج لفواصل بين هذه الموصلات لضمان وجود مسافة ثابتة بين الموصلات .

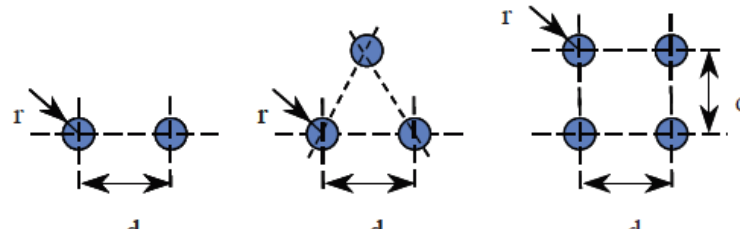


Figure 8-15 Bundle conductors

ويستخدم ال Spacer كما في الشكل 8-16. راجع الجزء الخاص بظاهرة الكورونا في الفصل التاسع للمزيد حول هذا الموضوع.



Figure 8-16 Spacer

8.6.2 خامد الاهتزازات Dampers

نتيجة الرياح الشديدة سيكون هناك اهتزازات قد تتسبب مع الوقت في مشاكل للخط و للعوازل ، ولذا فمعظم الخطوط تكون مزودة (لاسيما في الجهد العالي) بما يسمى Stockbridge dampers كما في الشكل 8-17



Figure 8-17 Dampers

وفكرة العمل كما في الشكل 8-18 أن الاهتزازات تنتقل من نقطة الاتصال رقم 6 إلى كابل قصير رقم 11 مركب عليه أثقال (غالبا كتل خرسانية أو معدنية) رقم 12 ، وطول الكابل مع الكتل المركبة مصممة بحيث تستنفذ طاقة الاهتزازات فيهم . ويتم تركيبه في بداية ونهاية كل موصل بين برجين .

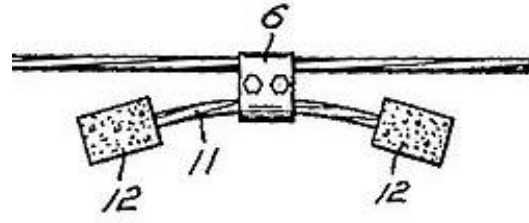


Figure 8-18 Damper in detailed

وهناك نوع آخر يستخدم لإخماد الاهتزازات يسمى spiral vibration damper وهو سلك ثقيل يلف مثل السوستة حول الموصل في كل جهة من جهات التثبيت كما في الشكل 8-19. وقد يستعمل النوعان معا.



Figure 8-19 Spiral Damper

8.6.3 كرات تحذير الطائرات

لعلك تلاحظ في بعض خطوط نقل القوى وجود كرات كما في الشكل 8-20 ، والتي أحيانا توضع على موصل الأرضي ، والغرض من هذه الكرات هو تحذير الطائرات المارة بالمنطقة إذا كانت قريبة من المطارات لاسيما طائرات الهيلوكوبتر التي قد تطير على ارتفاعات منخفضة . وقد تم تطوير هذه الكرات وتم وضع خلايا شمسية على سطحها الخارجي وكذلك مجموعة LEDs بحيث تعمل Flashing بالليل ويبلغ قطر الكرة حوالي 60 سم.

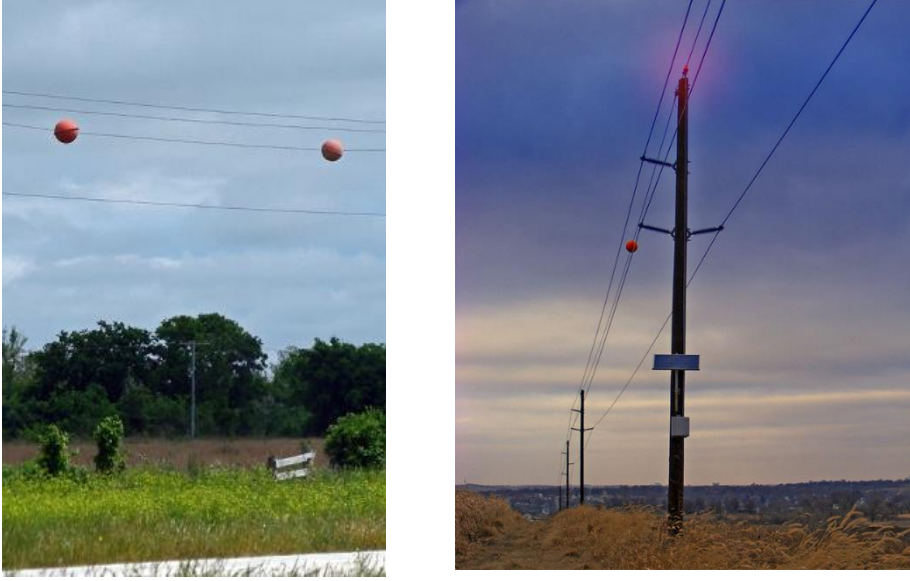


Figure 8-20 Warning Ball and Flash

كما يوجد نوع آخر من أجهزة الإنارة والتحذير يوضع على قمم أبراج الضغط العالي حسب تعليمات منظمة هيئة الطيران المدني وفيه إلزام بأن أى برج يزيد ارتفاعه أو يساوى 50 مترا لابد أن يوضع عليه جهاز ضوئى.

9

عوازل خطوط النقل

Insulators

معلوم أن جميع الموصلات المستخدمة في الشبكات الهوائية للجهد العالي والفائق هي موصلات غير معزولة ، و هذا هو السر في انخفاض التكلفة مقارنة بالكابلات ، لكن في المقابل يجب عزل هذه الموصلات عن الأرض وذلك بتعليقها و رفعها بعيدا عن مستوى الأرض ، و يجب عزلها عن الأبراج الحديدية من خلال سلاسل العوازل.

و تتكون العوازل المستخدمة في خطوط النقل من عدة أطباق Disc Insulators . وبالطبع يتغير عدد أطباق السلسلة حسب الجهد المستخدم. وعندما يكون الحمل الميكانيكي كبيرا يمكن استعمال سلسلتين على التوازي لحمل الموصل الواحد.

وكلما كان الجهد المستخدم عاليا كلما كان عدد الـ Discs أكثر ، وبالتالي طول مجموعة العوازل أكبر . والجدول 9-1 يعطى مثالا على ذلك (وبالطبع سيؤدي ذلك لزيادة تكاليف العازلية و حجم الأبراج) .

عدد أطباق العوازل حسب الجهد Table 9-1

Line Voltage (kV)	Number of Insulators per String
69	4-6
115	7-9
138	8-10
230	12
345	18
500	24
765	30-35

و هذه العوازل تمثل نقطة الضعف الأساسية في الشبكات الهوائية لعدة أسباب من أهمها تراكم الأتربة عليها مما يجعل من سطحها مسارا سهلا لتسرب التيار من الموصلات إلى الأرض خلال جسم البرج ، و لذا يجب عمل صيانة و نظافة دورية لهذه العوازل إضافة إلى مشكلة عدم انتظام توزيع الجهد على الأقراص المكونة لسلسلة العزل . وهذه المشكلة وغيرها ندرسها لاحقا في هذا الفصل.

9.1 وظيفة العوازل:

للعوازل وظيفتان أساسيتان هما:

- 1- وظيفة كهربية: وهي تأمين العزل الكهربية الكامل بين الموصلات (الأسلاك) الكهربائية و بين الأبراج الحاملة لها. وهذا لن يتم إلا إذا توفرت في العازل عدة سمات أهمها الكفاءة العالية للعزل الكهربى تحت أسوأ الظروف الجوية كالمطر و الرطوبة و الأمطار و التلوث ، وأيضا تحمل جهد تشغيل الخط بالإضافة إلى الجهود الناتجة من عمليات الفصل و التوصيل للمهمات.
 - 2- وظيفة ميكانيكية : وهى تثبيت الموصلات الكهربائية على الأعمدة أو الأبراج الكهربائية في جميع الظروف الجوية المتوقعة ، بحيث تتحمل مختلف القوى الميكانيكية المؤثرة عليها مثل وزن الموصل و قوة الشد.
- و يتوقف نوع العوازل و قوتها على نوع الخط المركبة عليه وجهده ، و كذلك على موضعها من البرج المستخدم ، ولها عدة تصنيفات :

9.2 تصنيف العوازل حسب الشكل التصميمى:

ويوجد منه عدة تصميمات :

9.2.1 تصميم عوازل الطاقة والمسمار

ويسمى Cap & Pin type insulator ، ويصنع هذا النوع (شكل 9-1 و 2) من البورسلين أو الزجاج. و يتميز هذا النوع من العازلات بإمكانية استبدال أى طبق تالف من السلسلة ، كذلك فإنه يصلح لكافة الجهود بدءا من المتوسطة و حتى فائقة الجهد 500 ك ف . ويتم تركيب الأطباق المختلفة معا بتوصيل مسمار الطبق الثانى بالشق أو الثقب الموجود بالأول (شكل 9-1) وهكذا حتى تتكون السلسلة بالطول المطلوب.



Figure 9-1 Cap and Pin

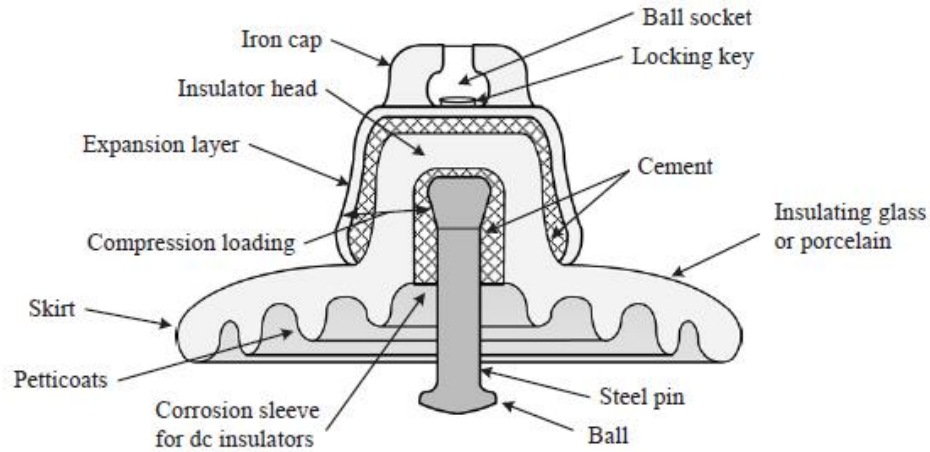


Figure 9-2 Cap and Pin

9.2.2 تصميم عوازل الساق الطويلة

ويصنع Long rod type insulator من البورسلين أو المطاط السليكوني (شكل 9-3) ، وأكثر استعماله في الـ Bushings الخاصة بالكابلات أو المحولات وفي محطات التحويل .

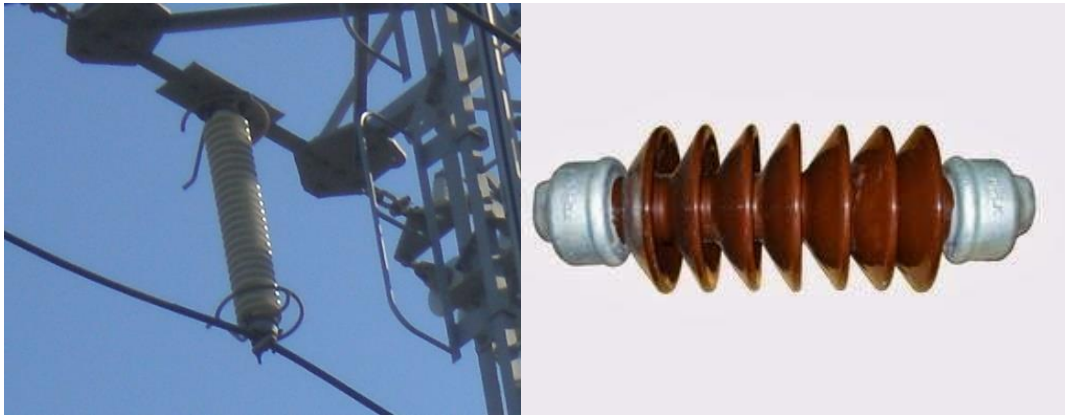


Figure 9-3 Long Rod Insulator

وفي الجهد المتوسط لدينا نوع ثالث وهو Pin type أى عازل المسمار فقط (شكل 9-4) ، ويستخدم حتى 33 كيلو فولت كما في الصورة . وهو مصنوع من قطعة واحدة من العزل مشكلة على شكل مظلة أو أكثر. والمظلة الواحدة تستعمل في جهد 11 ك ف وبعده يستعمل مظلتين أو ثلاثة في الجهود الأعلى كما في الصورة. وتكون المظلات متباعدة عن بعضها لتحسين العزل أثناء الأمطار. ويصبح استعمال هذا النوع من العوازل مرفوضا في الجهود العالية لصعوبة تغييره.



Figure 9-4 Pin Type Insulator

ملحوظة هامة:

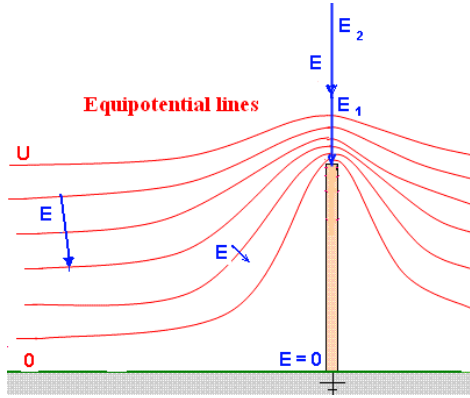


Figure 9-5 خطوط تساوى الجهد

قد يتسائل البعض هل هو مقصود فعلا أن يكون جسم العوازل بهذا الشكل وتلك المظلات؟ بالطبع نعم وهناك هدف هام من وراء هذا التصميم ، وهو جعل السطح الخارجى لمظلات العوازل يقع على الخطوط متساوية الجهد Equipotential lines للمجال الكهربى للموصلات (شكل 9-5) ومن ثم يقل أو يمنع تسرب التيار بين هذه النقاط لأنها ستكون متساوية الجهد. لاحظ أن شكل العازل يشبه شكل خطوط توزيع المجال.

9.3 تصنيف العوازل حسب مادة الصنع:

9.3.1 عوازل بورسلين: Porcelain :

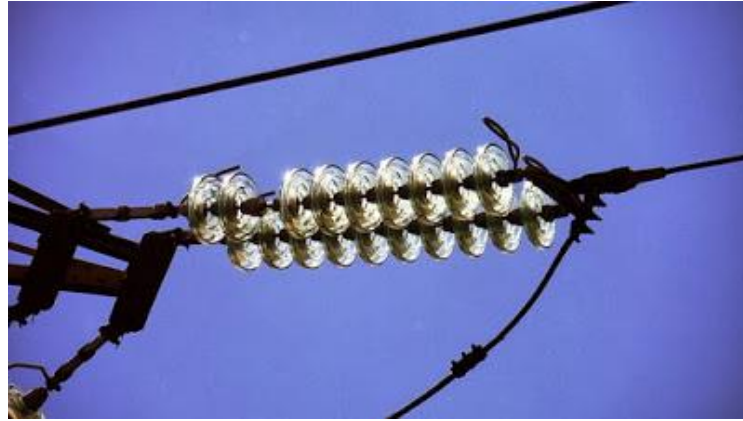
وهو نفسه الذى نسميه الخزف ويتمتع بعازلية كهربية مرتفعة إذا كان متجانسا و نقيًا و معالجا بصورة جيدة و خاليا من أي مسامات أو شوائب أو فقاعات مهما صغرت.

وتصنع عوازل البورسلين من سيليكات الألومنيوم ويخلط مع مادة الكاولين البلاستيكية ومادة الكوارتز ، وتصل شدة المجال الكهربى دون الانهيار إلى 60kV/cm بينما يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى 5,000 Kg / cm² ، ويصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى 500 Kg / cm².

ويصنع من البورسلين نوعي العوازل Cap & Pin Type و Long rod Type على السواء.

9.3.2 العوازل الزجاجية: Glasses

يتم تصنيع الزجاج (شكل 9-6) من السليكون ويكون عزله عاليا يصل إلى 140 kV/cm. ويتحمل قوة ضغط و قوة شد ميكانيكي بدرجة أكبر من أو على الأقل تساوى تلك التي يتحملها البورسلين (يصل تحمله لقوى الضغط Compressive Strength إلى $10,000 \text{ Kg / cm}^2$ ، بينما يصل تحمله لقوى الشد Tensile Strength إلى 500 Kg / cm^2) كما أنه أرخص وأطول عمرا من البورسلين.



عوازل زجاجية Figure 9-6

ويمتاز بأنه شفاف مما يجعل رؤية أى شوائب أو فقاعات غازية أو شروخ ممكنة بالعين المجردة و يعد شفافا بالنسبة للإشعاعات الحرارية ، و لذلك لا يسخن كثيرا بتعرضه لأشعة الشمس ، بالإضافة إلى أن معامل تمدده أقل من الخزف وهذا يجعل الإجهاد الذى يتعرض له نتيجة تغير درجة الحرارة أقل.

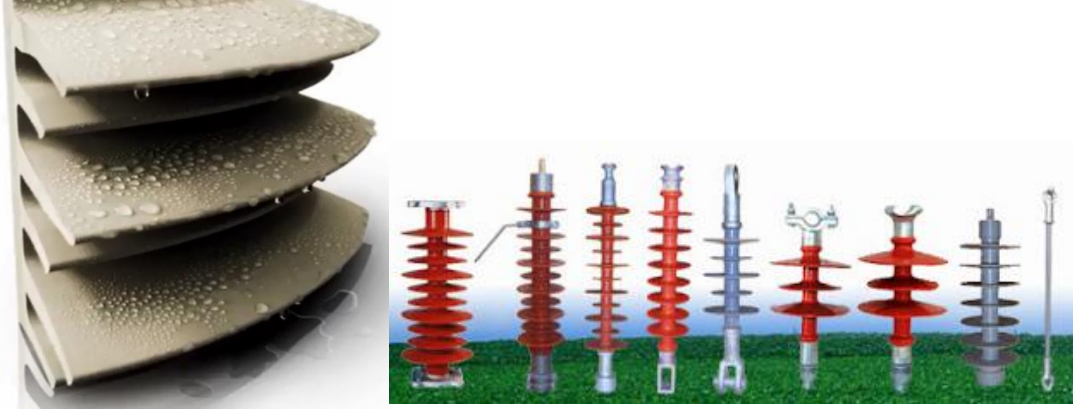
و له ميزة عملية تكمن في أنه إذا تعرض لصدمات ميكانيكية كرمي الحجارة عليه فإنه يكسر بالكامل فيسهل اكتشاف موقع العطل في خط النقل (أصبحت نقطة ضعفه هى سر تميزه) . بينما يتشقق عازل البورسلين فقط في الحالات المشابهة و بالتالي يصعب اكتشافه بالنظر إليه من سطح الأرض. ويصنع من الزجاج عوازل Cap & pin فقط.

و يكمن العيب الرئيسي للزجاج في سهولة تكاثف الرطوبة على سطحه ، و هذا يقلل إمكانية استخدامه في المناطق الرطبة .

9.3.3 العوازل المطاطية: rubber

تصنع هذه العوازل من البلاستيك المقوى و المطاط (البوليمر) و تتميز هذه العوازل بخفة وزنها مقارنة بالعوازل الأخرى. ويمتاز هذا النوع بعازلية فائقة لا تسمح للماء بالتواصل مع التلوث على العازل مما يحد من تأثير هذه العوازل بالتلوث (يحدث نوع من التكور (شكل 9-7) ومن ثم لا يكون هناك مسار متصل فيصعب على التيار أن يتسرب من خلال سطح العازل) .

كما يمتاز بخفة وزنه الكبيرة مقارنة بالعوازل الأخرى (نسبة واحد إلى 30) من وزن عازل البورسلين كما يمتاز بسهولة تركيبه على الأبراج . إلا أن أسعارها لا زالت أعلى من أسعار العوازل الزجاجية أو المصنوعة من البورسلين. ويصنع منه عوازل من نوع Long rod فقط.



عوازل مطاطية Figure 9-7

وأختم هذا الجزء بمثال تفصيلي لأحد الخطوط الهوائية بالمنطقة الوسطى بالسعودية جهد 380 ك.ف بين المحطتين رقم [9009 ، 9011] بمدينة الرياض والمجمعة لإعطاء تخيل صحيح لأعداد الأبراج والعوازل على أحد الخطوط الهوائية :

- 1- عدد الأبراج للخط الهوائي بين المحطتين 457 برج
- 2- طول مسار الخط الهوائي بين المحطتين 193 كم
- 3- جميع سلاسل العوازل للدائرتين على طول الخط [9009-9011] مصنوعة من أقراص الزجاج Toughened Glass Discs صناعة شركة SEDIVER فرنسا.
- 4- أطباق العوازل من النوع منبسط السطح Aero-Dynamic Profile لأن هذا الشكل من العوازل هو الأكثر ملائمة للبيئة الصحراوية الجافة مثل بيئة المنطقة الوسطى.
- 5- جميع الأبعاد لأطباق العوازل الزجاجية صناعة شركة SEDIVER الفرنسية مماثلة للأبعاد الخاصة بأطباق العوازل من البورسلين صناعة شركة NGK اليابانية وكذلك جميع الخواص الميكانيكية والكهربائية متماثلة للنوعين.
- 6- تتكون سلسلة العازل الزجاجية من عدد 26 طبق لجميع الأبراج على طول الخط الهوائي الجديد جهد 380 ك.ف الذي يربط بين المحطات [الرياض 9009 ، 9011 المجمعة].
- 7- بالمثل تتكون سلاسل العوازل على الجزء الثاني من الخط الهوائي جهد 380 ك.ف والذي يربط بين المحطتين [9011 المجمعة ، 9010 القصيم] ولكنها من أطباق البورسلين صناعة شركة NGK اليابانية.

9.4 الأعطال التي تتعرض لها العوازل:

1- كسر العوازل: وذلك نتيجة تعرضها للعوامل الجوية مثل (الصواعق) أو نتيجة تعرضها للعبث أو نتيجة صدام و تشقق القطع المعدنية المكونة لسلسلة العوازل .

2- انهيار العازلية Breakdown: يكون ذلك كنتيجة للعوامل التالية:

1. نتيجة تلوث العوازل سواء من العوامل الجوية أو قريباها من المصانع التي تخرج مخلفات تؤثر على سلاسل العوازل (كالإسمنت ، البوتاس ، . . . الخ)
2. تعرضها للجهود العالية سواء بسبب العوامل الجوية كالصواعق المفاجئة ، أو بسبب Switching الخ.
3. وجود تيارات متسربة. Leakage Current

9.4.1 تأثير التلوث على أداء العازل

يحتوى التلوث الطبيعي على نسبة عالية من الأملاح ، و نتيجة لوجود الشبورة المائية و حتى فى وجود الأمطار يذوب الملح على سطح العازل منشأ مسارا موصلا وبالتالي مسببا هبوطاً فى قيمة مستوى العزل حيث ينتج مسار لمرور التيار خلال الأتربة ذو مقاومة أقل من مقاومة العازل ، ويكون هذا المسار بالتوازي مع العازل الأصلي مما يقلل القيمة الكلية للمقاومة الناتجة فنقل مقاومة العزل ، و نتيجة لذلك يحدث Flashover على سلسلة العازل وهذا الأخير قد يتسبب فى حدوث شروخ على سطح العازل وخروج الدائرة من الخدمة بواسطة أجهزة الوقاية .

9.4.2 كيفية حدوث الومضة الكهربائية Flashover

سلسلة العزل تمثل بمكثف ، القطب الموجب له هو الخط الهوائى أما القطب السالب فهو الأرض (يمثلها هنا مسمار العازل المتصل بجسم البرج المؤرض) و الوسط العازل بينهما هو سلسلة العازلات .

ففى الوضع الطبيعي بدون أى تلوث أو أطباق تالفة لن يكون هناك أى مجال لحدوث Flashover باستثناء حالة واحدة فقط و هى حدوث Over-voltages على الخط بأكثر من 150 % من جهد الخط.

أما فى وجود الملوثات على سطح السلسلة فسوف تقل قيمة العزل بين القطبين الموجب و السالب إلى أن يحدث انهيار لقيمة العزل منها يحدث الومضة Flashover . وعند حدوث ذلك تصبح سلسلة العازل كما لو كانت مقاومة يسرى التيار من أحد طرفيها إلى الطرف الآخر وهذا بالطبع يعتبر Short circuit وسي تدخل جهاز الحماية لاكتشافه وعزله مما يسبب تعطل الخط.

وهذا الـ Flash over غالبا لا يسبب تلف العازل بل يعود العزل لأداء وظيفته العادية بعد حدوثه مالم تكن كمية الحرارة الناتجة عنه كبيرة جدا بحيث تسبب احتراق سلسلة العازل.

والشكل 8-9 يظهر المسافات التى يحدث عليها Flashover ، فهناك مسارات طويلة وهناك مسافات مختصرة وهى الأخطر مثل $D+B+C$ أو $A+B+C$ وهكذا. لاحظ أن لدينا فرق بين المسافة التى يزحف عليها التيار Creepage distance وبين المسافة المختصرة Clearance Distance كما هو واضح فى الجزء التالى.

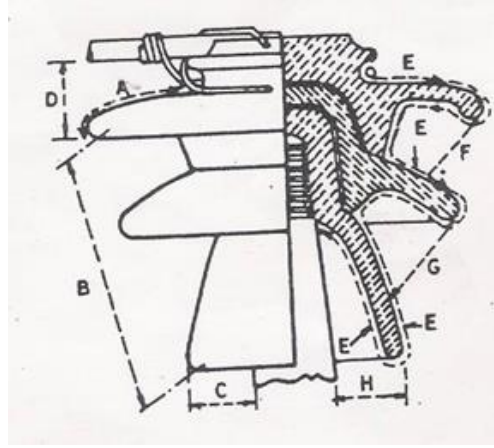


Figure 9-8

9.4.3 ما هى الـ Creepage Distance ؟ .

هو مصطلح مهم فى موضوع العزل والتلوث وتعنى مسافة الزحف ، ويستخدم هذا المصطلح فى تصميم العوازل بناء على نسبة التلوث فى المنطقة ، ويمكن تعريفه على أنه أقصر مسار مقاس خلال سطح العازل يصل بين نقطتين موصلتين (المسار كله يجب أن يكون على سطح العازل) و يمكن للتيار أن يسلكه ويسبب انهيار كهربى ، وبالطبع هذه المسافة تختلف عما يعرف بالـ Clearance Distance ويقصد بها أقصر مسافة فعلية بين نقطتين موصلتين لتحقيق مسافة آمنة تمنع حدوث arc بينهما كما فى الشكل 9-9 (ليس بالضرورة أن يكون المسار بالكامل على سطح العازل كما فى المصطلح السابق) .



Figure 9-9 مسافة الزحف

والجدول 9-2 من المواصفات الألمانية لتحديد مسافة الزحف حسب درجة التلوث.

Table 9-2 مسافة الزحف حسب درجة التلوث

Voltage r.m.s. ¹⁾ V	Minimum creepage distances								
	Printed wiring material								
	Pollution degree								
	1	2	1	2			3		
	All material groups	All material groups except IIIb	All material groups	Material group I	Material group II	Material group III	Material group I	Material group II	Material group III ²⁾
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
25	0,025	0,040	0,125	0,500	0,500	0,500	1,250	1,250	1,250
32	0,025	0,040	0,14	0,53	0,53	0,53	1,30	1,30	1,30
40	0,025	0,040	0,16	0,56	0,80	1,10	1,40	1,60	1,80
50	0,025	0,040	0,18	0,60	0,85	1,20	1,50	1,70	1,90
63	0,040	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,60	1,80	2,00
80	0,063	0,100	0,22	0,67	0,95	1,30	1,70	1,90	2,10
100	0,100	0,160	0,25	0,71	1,00	1,40	1,80	2,00	2,20
125	0,160	0,250	0,28	0,75	1,05	1,50	1,90	2,10	2,40
160	0,250	0,400	0,32	0,80	1,10	1,60	2,00	2,20	2,50
200	0,400	0,630	0,42	1,00	1,40	2,00	2,50	2,80	3,20
250	0,560	1,000	0,56	1,25	1,80	2,50	3,20	3,60	4,00
320	0,75	1,60	0,75	1,60	2,20	3,20	4,00	4,50	5,00
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11,0	12,5
1000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14,0	16,0

¹⁾

This voltage is
- for functional insulation, the working voltage,
- for basic and supplementary insulation of the circuit energized directly from the supply mains (see 4.3.2.2.1), the voltage rationalized through Table F.3a or Table F.3b, based on the rated voltage of the equipment, or the rated insulation voltage,
- for basic and supplementary insulation of systems, equipment and internal circuits not energized directly from the mains (see 4.3.2.2.2), the highest r.m.s. voltage which can occur in the system, equipment or internal circuit when supplied at rated voltage and under the most onerous combination of conditions of operation within equipment rating.

²⁾

Material group IIIb is no not recommended for application in pollution degree 3 above 630 V.

9.4.4 تنظيف العوازل

ويعتبر تراكم الأتربة والملوثات أحد أهم العوامل التي تؤدي إلى انهيار العازل وتسرب التيار من فوقه ، ولذلك فمن الضروري عمل نظافة دورية لهذه العوازل. وتختلف المدة حسب حجم التلوث الموجود في البيئة. ومن أشهر الطرق لتنظيف العوازل غسلها بالماء – بعد فصل الكهرباء عنها – ثم تطورت الطرق فصار يستخدم الطائرات في تنظيف العوازل دون فصل التيار باستخدام الماء المقطر (غير موصل للكهرباء) .

ومن الطرق الحديثة استخدام أنواع من العوازل لا يتراكم عليها التراب ، ففي جزيرة كريت باليونان كان ملح البحر المتبخر يتراكم على العوازل فاستخدموا مادة تشبه الشمع وتم دهن العوازل بها لتساعد على بلورة المياه التي تتكثف عليها و بهذا يصبح المسار للتيار المتسرب متقطعاً ولا يسمح بمرور التيار. و يتم الدهان بهذه المادة كل ثلاث سنوات و قد وجد أن تكاليف استخدامها أقل بكثير من تكاليف الصيانة العادية والتي يتم فيها غسل العوازل سواء بالسيارات والروافع أو بالطائرات كما في الشكل 9-10.



Figure 9-10 تنظيف العوازل بالطائرات و بالأوناش

9.5 أسباب ظهور الجهود الزائدة على شبكة النقل

المشكلة الأساسية التي تدمر عوازل الخطوط الهوائية هي تعرضها لجهود عالية على سطحها Over Voltage ، وهذه الجهود العالية كافية لكسر العازل (ليس بالضرورة أن ينكسر طبق العزل حقيقيا ، بل يكفي أن ينهار العازل على سطحه حتى نقول أن طبق العزل قد انكسر) . وهناك أسباب عديدة لحدوث ارتفاع في جهد الخط أو ظاهرة الـ Over Voltage على الخطوط الهوائية . ومن هذه الأسباب:

- 1- اصطدام صاعقة برق بالخط
- 2- حدوث فصل وتوصيل للقواطع CB Switching
- 3- توصيل المكثفات
- 4- حدوث Open Circuit وبالتالي ظاهرة Ferro Resonance
- 5- حدوث ظاهرة Ferranti Effect
- 6- حدوث ظاهرة القوس الأرضي Arcing Ground
- 7- ظاهرة ارتفاع الجهد نتيجة حدوث قصر Short Circuit

والظواهر الأربعة الأولى ستجد شرحا تفصيليا لهم في الباب السادس بالكتاب (الفصل التاسع والعشرون) ، أما الظواهر الثلاثة الأخيرة فهي مشروحة في هذا الباب لكن في الفصل العاشر (TL Parameters) وذلك لارتباطها كليا بمكثفات خطوط النقل .

9.5.1 تأثير الجهود الزائدة على سلسلة العوازل

قد يضرب البرق مثلا أحد موصلات الخطوط الهوائية ومن ثم تسير الـ Surge على الخط وتحاول الوصول للأرض من خلال سلسلة العزل ، ولذا تزود السلاسل بما يسمى Rod Gap كما في الشكل 9-11 ، فإذا ارتفع الجهد فجأة بسبب صاعقة برقية أو غيره كان المرور خلال هذه الـ Gap أسهل من المرور خلال سلسلة العزل ومن ثم تكون الـ Gap قد حمت السلسلة. وبالطبع سيتوقف طول مسافة الـ Gap على طول السلسلة وجهد الخط.

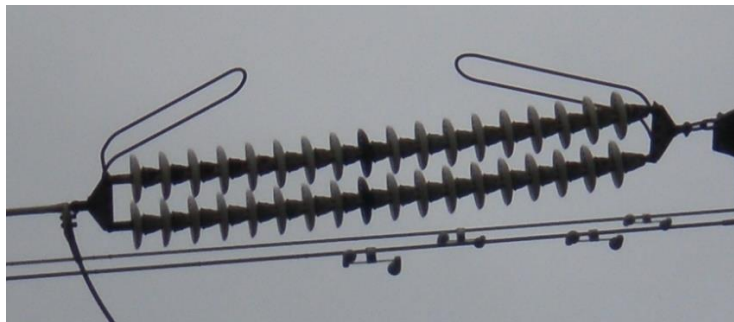


Figure 9-11 Rod Gap

9.6 ظاهرة الكورونا

تعتبر الكورونا من أبرز المشاكل التي تواجه العوازل عامة . وهذه الظاهرة عبارة عن حدوث تفريغ جزئي Partial Discharge لوسط عازل أو مرور تيار متسرب من الموصل الأصلي إلى الهواء الجوى المحيط به بصورة عشوائية نتيجة تأين الهواء المحيط ، وتعتبر هي الظاهرة مؤشرا لحدوث انهيار محتمل للعزل (كلمة العزل تتضمن أيضا الهواء كنوع من العوازل) .

وتحدث هذه الظاهرة عندما يتجاوز شدة المجال الكهربى electric field عند سطح الموصل الحد المعروف بـ disruptive potential gradient وهو الحد الذى يساوى فى حالة الهواء الجوى 30 kV/cm (مع ملاحظة أن هذه القيمة تتغير مع الضغط الجوى ولذا فمشكلة الكورونا أكثر وضوحا فى الأماكن المرتفعة عن سطح الأرض) ويترتب على ذلك أن يصبح الهواء المحيط بالموصل ليس عازلا كاملا بل تصبح له درجة من درجات التوصيل a conductive plasma فقط فى منطقة محيطة بالموصل. لكن قد تزداد هذه الطبقة الموصلة مع الوقت حتى ينكسر العزل بين الموصلات ويحدث انهيار كامل من خلال شرارة كهربية.

والمجال الكهربى عموما يزداد عند الأسطح الحادة لأن التغير فى قيمة الجهد يكون كبيرا وليس تدريجيا كما فى الأسطح الملساء ومن ثم ترتفع قيمة kV/cm بقيم كبيرة تتسبب فى بروز هذه الظاهرة بوضوح أكبر .

ومن ثم فدائما هناك مسافة كافية بين موصلات خطوط النقل لتجنب الوصول لهذه القيمة. ولكن قد تجد ظروف معينة تجعل المجال الكهربى المسلط على الهواء يتزايد ، وعندها يبدأ الوسط العازل (هواء / زيت / أو غيره) فى التأين .

وتحدث ظاهرة (التفريغ الجزئى) Partial Discharge أو الكورونا فى أى وسط عازل بالقرب من جهود كهربية فى الخدمة ، سواء كان ذلك خطوط النقل أو فى أى عازل آخر مثل الزيت مثلا داخل الـ CB ، وفى حالة خطوط النقل يتأين الهواء المحيط حول موصلات الجهد العالي وتزداد الظاهرة وضوحا كلما كان سطح الموصل غير منتظم وأيضا كلما زادت الرطوبة والتلوث فى الوسط العازل حيث تزداد نسبة ذرات الهواء المتأين حول الموصل .

ويمكن ملاحظة ذلك على خطوط النقل الكهربى كوميض لامع مائل للزرقة (شكل 9-12 ، وتكون هذه الظاهرة مصحوبة بصوت أزيز وإنتاج غاز الأوزون وهذه الظاهرة تسمى Partial Discharge أى يحدث تفريغ جزئى داخل العازل وهو يعتبر مقدمة للانهيار فى العزل Breakdown.



Figure 9-12 corona

وبالطبع ينتج عن وجود هذه الظاهرة حدوث مغايد للقدرة الكهربائية تسمى Corona Losses. تتمثل في حالة من الضوء يميل للون البنفسجي أو الأزرق ، والصوت المصاحب للظاهرة إضافة إلى حدوث تداخلات مع موجات الراديو. Radio Interference.

وهذه معادلة تقريبية للجهد الذى تبدأ عنده الكورونا بالظهور . وواضح أنها تعتمد على درجة خشونة السطح وعلى قطر الموصل وبعده عن بقية الموصلات الحاملة للجهد

$$V_0 = 21.1 * m \frac{\delta * r(1+0.3)}{\sqrt{r}} \log_n \left(\frac{D}{r} \right)$$

• V_0 = corona starting voltage, KV(rms)
 • r = radius of conductor in cm
 • D = GMD equivalent spacing b/n conductors in cm
 • m = roughness factor
 = 1.0 for clean smooth conductor
 = 0.85 for stranded conductor

9.6.1 أسباب ظاهرة الكورونا :

- **ارتفاع الجهد الكهربى** : فمن أهم أسبابها ارتفاع الجهد على الخطوط وبالتالي يزداد شدة المجال وتزداد احتمالية تأين الذرات حول الموصل.
- **انخفاض شدة العزل** : ومن أسبابها أيضا انخفاض شدة العزل نتيجة تلوث أو رطوبة مثلا . تذكر أن المجال الكهربى يتأثر بقيمة الجهد ولا علاقة له بقيمة التيار ومن ثم فالظاهرة لا تتأثر بقيمة التيار فى الخطوط.
- **تقارب الموصلات** : ومن أسبابها أيضا تقارب المسافات بين الأجزاء الحاملة للجهد.
- **عدم انتظام المجال الكهربى** : مع التأكيد على أن أكثر الأماكن تأثرا بهذه الظاهرة هى الأماكن غير المنتظمة السطح حيث يصبح توزيع المجال فيها غير منتظم فيزداد فى نقاط (يحدث فيها التأين) ويقل فى نقاط أخرى.

9.6.2 الحلول الممكنة لظاهرة الكورونا :

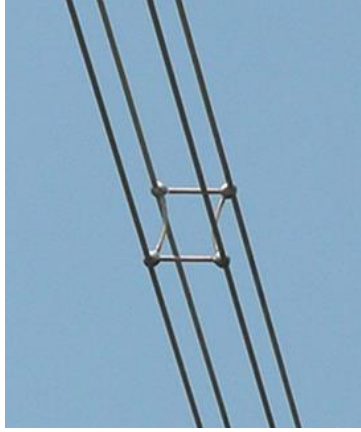


Figure 9-13 Bundle Conductors

- 1- الحل الأمثل هو زيادة مساحة مقطع الموصل وبالتالي يقل قيمة المجال على سطح الموصل (راجع المعادلة السابقة لحساب الجهد الذى يبدأ عنده حدوث الكورونا ، و ستجد أن قيمة نصف القطر فى مقام المعادلة ، بمعنى كلما زاد نصف القطر كلما كبر الجهد الذى يحدث عنده بداية التفريغ) .
وأحد طرق زيادة المقطع هو استخدام الـ *bundled conductors* وذلك بجعل موصل الـ *Phase* الواحدة عبارة عن موصلين أو أكثر ثم عمل *short circuit* على هذه الموصلات (شكل 9-13) ، وبالتالي يزيد المقطع المكافئ لكل موصل ومن ثم يقل المجال المحيط به فلا تتأين ذرات الهواء .
 - 2- زيادة المسافة الفاصلة بين الفازات لتقليل شدة المجال أيضا ولكن ذلك سيؤدى إلى زيادة حجم البرج وارتفاع التكلفة.
 - 3- ولأن هذه الظاهرة ليست فقط معتمدة على المجال الكهربى ولكنها تتأثر بشدة بشكل الأسطح الحاملة للتيار ، وبصفة عامة يجب تجنب الأسطح الحادة فى خطوط النقل وغيره لتجنب الارتفاع فى الـ *Voltage Gradient* ، ولذا يستعمل مثلا وسائل تعليق للموصل لها حواف مستديرة الشكل بدلا من الحواف الحادة *rounded rather than sharp edges* ، وكذلك الحال أيضا بالنسبة للـ *Spacers* وخامد الاهتزازات (لاحظ الصور السابقة لهذه العناصر).
 - 4- وبالتأكيد يجب تجنب الارتفاع فى الجهد لأنه أحد أهم الأسباب الرئيسية.
 - 5- استخدام ما يعرف بـ **Corona Rings** ، فمن ما سبق يتبين أن أحد أهم أسباب هذه الظاهرة هو عدم انتظام السطح وهذا ما يحدث عند تعليق الموصل بسلسلة العزل فتكون نقطة الاتصال معرضة أكثر من غيرها لحدوث الكورونا بسبب السطح الحاد فى التغير ، ولعلاج ذلك توضع الحلقات كما فى الصورة متصلة بالموصل المعدنى الحامل للجهد فإذا ظهرت الكورونا فإنها تظهر على الحلقات وليس على أطباق العازل ومن ثم فقد تم حماية العزل.
- وتستخدم هذه الحلقات (شكل 9-14) أيضا مع مانعات الصواعق *Lightning Arrestor* وكذلك تستخدم فى أطراف الـ *CB* والمحولات لنفس الغرض وهو حماية أطراف العزل من التغير المفاجئ فى الجهد أو التغير المفاجئ فى الشكل والذى ينتج عنه قيمة مرتفعة للـ *Voltage gradient , kV/cm* ، والتى تتسبب فى ظاهرة الكورونا.

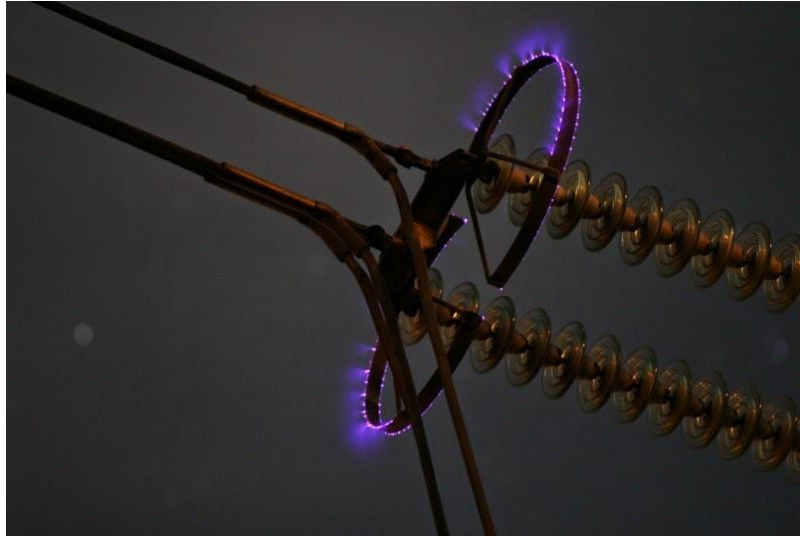


Figure 9-14 Partial Flashover on corona rings

وهذه الحلقات تتصل مباشرة بالموصل كما ذكرنا عند نقطة اتصاله بسلسلة العزل لأنها أخطر منطقة معرضة للكورونا ، ويمكن القول أن هذه الحلقات تغير شكل المجال الكهربى بحيث لا يصبح قادرا على تأيين ذرات الهواء المحيطة بالموصل أو العزل. فال Gradient, kV/cm أصبح ضعيفا بسبب كبر القيمة الموجودة فى المقام لأن المجال الكهربى أصبح محيطا بحلقة قطرها واسع وليس بنقطة اتصال صغيرة ومن ثم صغرت قيمته.

9.7 توزيع جهد التشغيل على سلسلة العازل:

في حالة استخدام أكثر من قرص Disc في السلسلة String ، كما هو الحال فى شبكات الجهد المرتفع فعندها نظريا سيتم توزيع فرق الجهد على العوازل الموجودة بالسلسلة بالتساوي بمعنى لو كان جهد الشبكة يساوي 500 كيلو فولت فهذا يعني أن الجهد على سلسلة العزل المكونة من 20 قرص مثلا سوف يساوي 25 kV/disc و هذا طبقا لقانون توزيع الجهد كما في الجزئين يسار الشكل 9-15. حيث يمثل كل قرص وكأنه مكثف وبالتالي يكون لدينا مجموعة من الـ Series Capacitors وهو تمثيل حقيقى فالمكثف ليس سوى لوحين معدنيين بينهما عازل وعليهما فرق للجهد ، وهو الحاصل هنا بين النقاط المعدنية .

لكن هذا غير متحقق في الواقع و السبب هو وجود تلك الوصلات الحديدية التي تربط كل قرص Disc بما قبله و بما بعده في السلسلة ، فهذه الوصلات الحديدية ينشأ بينها و بين حديد البرج مكثفات أخرى تسمى Shunt Capacitors, C_1 كما فى الشكل الأيمن 9-15.

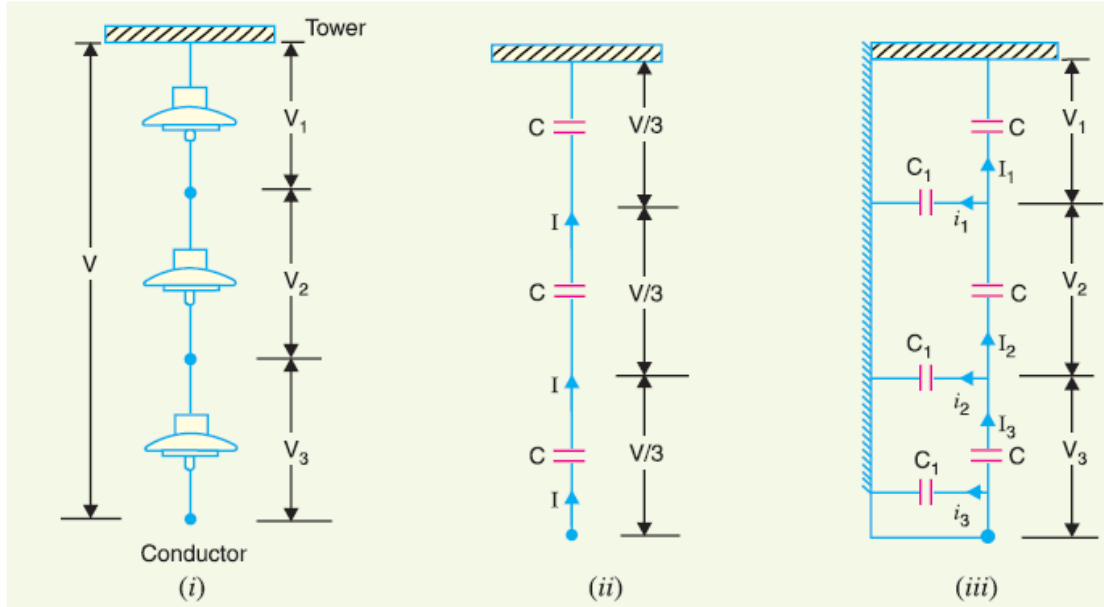


Figure 9-15 توزيع الجهد على سلسلة العزل

فيتميز توزيع التيار ليصبح كما في أقصى يمين الشكل السابق. و من ثم يصبح التيار المتسرب خلال السلسلة في حالة افتراض وجود النوعية الثانية من المكثفات ليس متساويا على كل الأقراص كما في الحالة المثالية الأولى ، بل يصبح التيار الأكبر هو التيار المار في الـ Disc الأقرب إلى الموصل ثم يقل التيار بعد ذلك و من ثم فلم يعد التيار متساويا على كل مسافة و هذا يعني أن بعض أقراص السلسلة ستتعرض لإجهاد كهربائي أكثر من غيرها و ربما يحدث لها إنهييار أو على الأقل يحدث خلالها Flashover بسهولة .

9.7.1 رفع كفاءة توزيع الجهد

ونظرا لأن الجهود غير متساوية على عوازل السلسلة الواحدة فقد استخدم مصطلح كفاءة السلسلة أو ما يعرف بـ String Efficiency لتحديد حجم الفرق بين أعلى جهد يظهر على القرص الأول من أجزاء السلسلة من ناحية الموصل و هو القرص المعرض لأعلى جهد ، و بين الجهد الكلي الواقع على الـ String مع ملاحظة أن الجهد يتناقص على الأقراص التالية.

حيث أن: كفاءة السلسلة التي بها عدد n من الأطباق يساوي

$$\text{String efficiency} = \frac{\text{Voltage Across the string}}{n \times \text{Voltage across disk nearest to Conductor}}$$

واضح أن كفاءة السلسلة تقل بزيادة عدد الأطباق نتيجة للتوزيع غير المتماثل للجهد ، فعلى سبيل المثال لو كان الـ Flashover Voltage على عزل ما يساوي 78 ك ف وكان لدينا ثلاث سلاسل مختلفة بها 5 و 10 و 15 طبق بالسلسلة على التوالي ، فعندئذ سيكون جهد الـ Flashover Voltage على السلاسل الثلاثة يساوي 685 و 490 و 280 ك ف على الترتيب (واضح أنه كلما زاد الطول قلت الكفاءة) ، فلو كانت الجهود متساوية لأمكن في هذه الحالة استخدام 4 و 7 و 9 عوازل .

وبالتالي إذا استطعنا أن نجعل الجهد متساويا على كل أطباق السلسلة فعندئذ يمكن استخدام سلسلة أقصر وأقل تكلفة.

والجدول التالي يعطى بعض النتائج العملية لاختبارات تمت على سلسلة عزل تتزايد عدد الأطباق فيها تدريجيا حتى تصل إلى عشرة أطباق وفي كل مرة نحسب الكفاءة في حالتين : العازل جاف والعازل رطب والنتائج كما يلي:

[S.O.V. = Spark-over Voltage]

No. in series.	S.O.V., Dry (kV.).	String Effic., Dry. (Per cent.)	S.O.V., Wet (kV.).	String Effic., Wet. (Per cent.)
1	75	100	48	100
2	140	93.4	90	92
3	195	86.7	128	89
4	245	81.8	166	86.5
5	295	78.8	205	85.5
6	345	76.7	245	85.1
7	395	75.4	280	83.4
8	445	74.2	320	83.4
9	490	72.8	355	82.2
10	535	71.4	385	80.3

Example 8.1. In a 33 kV overhead line, there are three units in the string of insulators. If the capacitance between each insulator pin and earth is 11% of self-capacitance of each insulator, find (i) the distribution of voltage over 3 insulators and (ii) string efficiency.

Solution. Fig. 8.14. shows the equivalent circuit of string insulators. Let V_1 , V_2 and V_3 be the voltage across top, middle and bottom unit respectively. If C is the self-capacitance of each unit, then KC will be the shunt capacitance.

$$K = \frac{\text{Shunt Capacitance}}{\text{Self - capacitance}} = 0.11$$

$$\text{Voltage across string, } V = 33/\sqrt{3} = 19.05 \text{ kV}$$

At Junction A

$$I_2 = I_1 + i_1$$

or

$$V_2 \omega C = V_1 \omega C + V_1 K \omega C$$

or

$$V_2 = V_1 (1 + K) = V_1 (1 + 0.11)$$

or

$$V_2 = 1.11 V_1 \quad \dots(i)$$

At Junction B

$$I_3 = I_2 + i_2$$

or

$$V_3 \omega C = V_2 \omega C + (V_1 + V_2) K \omega C$$

or

$$V_3 = V_2 + (V_1 + V_2) K$$

$$= 1.11 V_1 + (V_1 + 1.11 V_1) 0.11$$

\therefore

$$V_3 = 1.342 V_1$$

(i) Voltage across the whole string is

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = V_1 + 1.11 V_1 + 1.342 V_1 = 3.452 V_1$$

or

$$19.05 = 3.452 V_1$$

$$\therefore \text{Voltage across top unit, } V_1 = 19.05/3.452 = \mathbf{5.52 \text{ kV}}$$

$$\text{Voltage across middle unit, } V_2 = 1.11 V_1 = 1.11 \times 5.52 = \mathbf{6.13 \text{ kV}}$$

$$\text{Voltage across bottom unit, } V_3 = 1.342 V_1 = 1.342 \times 5.52 = \mathbf{7.4 \text{ kV}}$$

$$(ii) \quad \text{String efficiency} = \frac{\text{Voltage across string}}{\text{No. of insulators} \times V_3} \times 100 = \frac{19.05}{3 \times 7.4} \times 100 = \mathbf{85.8\%}$$

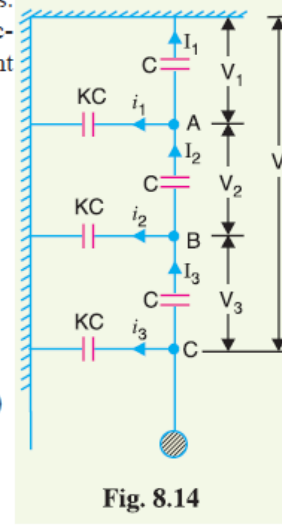


Fig. 8.14

9.7.2 علاج انخفاض كفاءة سلسلة العزل

و لعلاج مشكلة المكثفات الناشئة التي تسببت في عدم تساوى الجهد يمكن نظريا إلغاء هذه المكثفات بزيادة طول ذراع البرج ومن ثم تصبح قيمة هذه الـ Shunt Capacitors مهمة لكن بالطبع هذا حل مكلف بسبب ارتفاع تكلفة تصنيع البرج.

والحل الأمثل الواقعى المستخدم هو أن تضاف الحلقات المعدنية التي نراها في 9-16 والمعروفة باسم Guard Rings و هذه الحلقات تنشئ مكثفات معاكسة من الجهة الأخرى كما في الصورة 9-17 ، و من ثم فإنها تلغي بدرجة كبيرة تأثير Shunt Capacitors السابقة و تقرب الصورة مرة أخرى إلى الحالة المثالية .

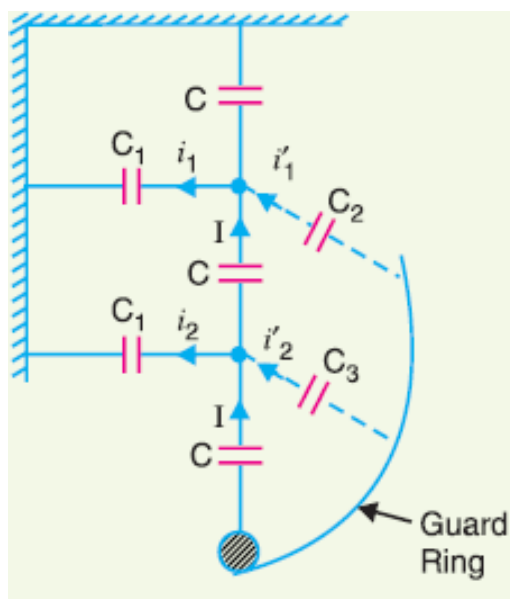


Figure 9-16 guarding ring



Figure 9-17

9.7.3 أسلوب الـ Insulation Coordination

وهناك حل ثالث لهذه المشكلة بجعل الـ Capacitance لأطباق العوازل غير متساوية بل متغيرة بنسب التيارات المارة بها وهذا يعنى أن الطبقة المجاور للموصل ستكون له أكبر Self-Capacitance فى السلسلة ومن ثم تتساوى الجهود على أطباق العوازل لأن الجهد سيتناسب عكسيا مع الـ Self-Capacitance للطبقة ، وبالتالي يقل الجهد على الطبقة المجاور للخط ويزيد على الطبقة فى نهاية السلسلة من ناحية البرج ، وهذا يعنى أننا عالجتنا الخلل السابق فى توزيع الجهد . وتعرف هذه الطريقة بتنسيق العوازل Insulation Coordination .

10

تمثيل خطوط النقل

TL Parameters

10.1 مقدمة

البداية في هذا الموضوع تكون بحساب قيم العناصر الأساسية الثلاثة (R , L and C) الممثلة للخط (TL Parameters) . و أهمية ذلك تكمن في أن معرفة هذه القيم هي الأساس في تمثيل حقيقي للخطوط . وتمثيل الخطوط هو الأساس في جميع الحسابات والتحليلات في منظومة القوى مثل حسابات انتظام الجهد Voltage Regulation ، وحساب كفاءة النقل Transmission Efficiency ، وحسابات القصر Short circuit analysis ، وخلافه. ومن هنا كان لابد من حساب هذه الـ Parameters .

وقد يبدو لأول وهلة أن الخط الكهربى هو فقط عبارة عن موصل له مقاومة قيمتها R ، وهذا جزء من الحقيقة ، أما الحقيقة الكاملة فإن الخط يشتمل أيضا على قيمة حثية L Inductance، تمثل مع قيمة المقاومة ما يعرف بالـ Z Impedance، ويشتمل الخط أيضا على قيمة سعوية C Capacitance، تمثل مع الـ Conductance ما يسمى بالـ Y Admittance .

وفى الأجزاء التالية سندرس كيفية حساب قيمة كل عنصر من عناصر التمثيل الثلاثة : R , L and C ، وتأثير كل واحد منهم على أداء منظومة النقل.

10.2 مقاومة الخط

تمثل المقاومة عنصرا مهما فقط فى الخطوط القصيرة حيث تكون غالبا مرتفعة القيمة ومن ثم تتسبب فى هدر كبير للقدرة (I^2R loss) على صورة حرارة ، ومع زيادة التحميل ترتفع قيمة التيار ومن ثم القدرة المفقودة على صورة حرارة .

وقد ترتفع درجة حرارة الموصل فيتمدد ويزداد طوله ويحدث Sag كبير ، فإذا انخفض التيار رجع الموصل لما كان عليه ، لكن إذا ارتفعت قيمة التيار بحيث تتسبب فى حدوث تمدد كبير وفى نفس الوقت لا ينكمش بعد

انخفاض التيار فنقول أن هذا لتيار تجاوز مايسمى بالـ thermal limit of conductor. وعموما يجب أن يكون تحميل الخط دائما أقل من هذه القيمة.

10.2.1 العوامل المؤثرة على قيمة مقاومة الموصل

معلوم أن مقاومة أى سلك تساوى

$$R = \frac{\rho \times L}{A}$$

ρ is the resistivity of the conductor.

إلا أن مقاومة السلك تتأثر أيضا بالعوامل التالية:

1- الجدل

ومعظم الخطوط كما ذكرنا فى الفصل الخاص بتركيب الخطوط الهوائية تستخدم الموصلات من النوع المعروف بـ ACSR وفى هذا النوع يكون سلك الصلب فى الوسط ومحاط بشعيرات من الألومنيوم على صورة طبقات مجدولة ، وهذا الجدل يتسبب فى أن يكون الطول الفعلى للموصل أكبر بنسبة 2% تقريبا عن الطول الاسمى للخط وبالطبع ستزيد المقاومة.

2- ظاهرة الـ Skin Effect

حيث يمر يميل التيار المتردد للمرور فى الحدود الخارجية لمقطع الموصل أكثر من مروره فى منتصف المقطع لاسيما مع ارتفاع التردد ، ولهذا تكون R_{AC} أكبر من R_{DC} وهذا سبب آخر لزيادة قيمة المقاومة عن القيمة النظرية من المعادلة السابقة

3- درجة الحرارة

وأخيرا فإن المقاومة تتناسب طرديا وخطيا مع ارتفاع درجة الحرارة ولذا يجب مراجعة المصنع لمعرفة معاملات التمدد وتصحيح قيم المقاومة.

10.2.2 ظاهرة التأثير السطحي Skin Effect



لو نظرنا للموصل على أنه مكون من طبقات (شكل 10-1) وكل طبقة تحمل قدرا من التيار ، وكل تيار يرتبط بقدر معين من الفيض ، فهذا يعنى أن الطبقة الأولى الداخلية ترتبط بقدر من الفيض يبدأ من الداخل ويقطع كل الطبقات التالية ، ثم يأتى تيار الطبقة الثانية فيقطع كل الطبقات من الثانية حتى نهاية الموصل لكنه لا يقطع الطبقة الأولى ، وهذا يعنى أننا كلما اتجهنا لداخل الموصل زاد الفيض المرتبط بالموصل أو ما يعرف بالـ Flux Linkage وكما

هو موضح فى الجزء التالى مباشرة فإن قيمة الـ Inductance توزيع الفيض داخل الموصل Figure 10-1

تتناسب طردياً مع قيمة الـ Flux Linkage وهذا يعنى أن المعاوقة الحثية بالطبقات الداخلية أكبر بكثير من المعاوقة الموجودة فى الطبقات الخارجية ، وهذا يعنى بالضرورة أن التيار فى الطبقات الداخلية سيكون أقل من التيار بالطبقات الخارجية.

10.2.3 العوامل المؤثرة على الـ Skin Effect

- 1- قيمة التردد: معلوم أن الـ Inductive reactance تتأثر طردياً بقيمة التردد فهذا يعنى أنه كلما زاد التردد زادت X_L وبالتالي قل التيار وهذا يؤكد على تناقص قيمة التيار فى وسط الموصل مع تزايد قيمة التردد
- 2- قطر الموصل: مع تزايد قطر الموصل يزداد الفرق بين قيمة الفيض المرتبط بقلب الموصل (يزداد قوة) وبين الفيض المرتبط بأطراف الموصل الخارجية (يزداد ضعف) وهذا يعنى أن X_L تزداد قيمتها مع تزايد قيمة المقطع .

10.2.4 لماذا نلجأ لاستخدام حزم من الموصلات Bundle Conductors

المناقشة السابقة تفسر لماذا نلجأ إلى عملية الـ Bundle Conductors ، أى استخدام حزمة موصلات صغيرة (من هنا جاء مسمى الموصلات الحزمية) بدلاً من موصل واحد كبير ، لأن الموصل الكبير فى مقطعه تظهر فيه ظاهرة الـ Skin Effect بدرجة أكبر ومن ثم يقل الاستفادة من المعدن الداخلى للموصل بل يعتبر وزناً إضافياً بلا داع ولا فائدة ، ومن هنا نلجأ للـ Bundle .

10.3 القيمة الحثية للخط وتأثيراتها

قد يقول قائل من أين تأتى الـ Inductance ونحن لدينا فقط خط موصل وليس فيه ملفات؟ وهذا خطأ شائع وهو اعتبار أن الـ Inductance, L لا تظهر إلا فى وجود ملفات Coils ، والسبب فى هذا الخطأ الشائع هو عدم معرفة معنى الـ Inductance .

10.3.1 ما هى الـ Inductance , L ؟

فى الخطوط الهوائية الطويلة والمتوسطة سنكتشف أن قيمة الـ Inductance, L والقيمة الأومية لها وهى Inductive Reactance, X_L والتى تساوى $X_L = \omega L$ ستكون هى المعاوقة الأساسية للخط وليس المقاومة الأومية R . فمرور التيار المتردد AC Current فى أى خط يكون دائماً مصحوباً بظهور هذه المعاوقة X_L .

والسبب في ذلك أن التيار المتردد يكون مصحوبا بمجال مغناطيسي متردد أيضا وهذا المجال يقطع الموصل نفسه وينشأ فيه emf معاكسة للجهد الأصلي الموجود على الخط فيتسبب ذلك في انخفاض قيمة التيار المار بالخط . إذن هناك مقاومة جديدة ظهرت نتيجة مرور التيار المتردد ، ونعبر عن هذه الظاهرة بتمثيل هذه المعاوقة الجديدة X_L ، التي لا تظهر إلا في وجود التيار المتردد (عكس المقاومة R والتي تظهر سواء كان التيار متردد أو ثابت) بل حتى بدون تيار فهي موجودة أما الـ X_L فهي فقط موجودة مادام التيار المتردد موجودا. لاحظ أن هذه المعاوقة تظهر سواء كان لدينا خط مستقيم أو لدينا ملف ، لكن بالطبع إذا كان السلك على شكل ملف فإن الـ Inductance له ستزيد.

وتعرف الـ Self-Inductance بأنها نسبة الفيض المرتبط بالخط مقارنة بالتيار المار في نفس الخط. بمعنى أن $L = \Phi/I$. وهناك نوع آخر من الـ Inductance تتأثر بالتيار المار في سلك مجاور فيظهر في السلك Mutual Inductance ، $M = \Phi/I_2$ ، كما في الشكل 10-2 .

ولذا تتوقف قيمة الـ Inductance, L على وضعية الخطوط (الموصلات) بالنسبة للمجال المغناطيسي وهل الخط منفرد أم بجوار خطوط أخرى وهل الخطوط الأخرى متوازية معه وفي نفس الـ Phase أم من Phases أخرى ولهذا ستتوقف قيمة الـ Inductance L على شكل الدبرج ونوعية الدوائر التي يحملها كما سنرى في الملحق الموجود بنهاية هذا الباب.

وهذه القيمة تمثل القيمة الكلية للـ L الناتجة من الفيض المرتبط بالموصل داخليا Self-Inductance وخارجيا Mutual Inductance ، وتقاس بوحدة الـ H, Hennery ، وغالبا تكون لكل كم طولى من الخط.

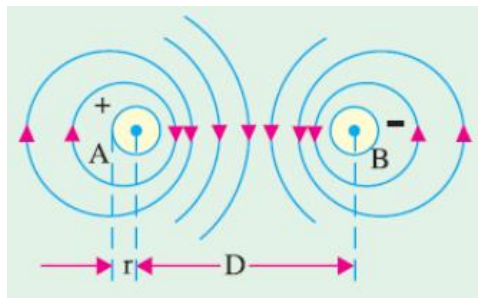
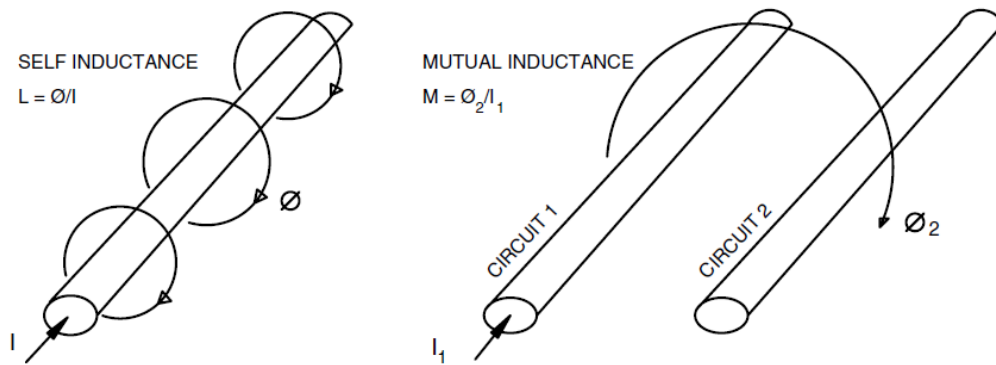


Figure 10-2 Self and Mutual Inductance

والمعادلة التالية تعطى علاقة الـ Inductance بأبعاد الموصلات

$$L = \frac{1}{l} \mu_0 K N^2 A$$

$$L = 2 \times 10^4 \left(\frac{\mu}{\pi} \log_e D/r + \frac{\mu_i}{4\pi} \right) \text{henry}$$

لاحظ أن المعادلة الأولى تعطى قيمة الـ Inductance بدلالة عدد اللفات بينما الثانية تعطيها بدلالة المسافات بين الخطوط الهوائية وأقطارها.

وقد يسأل سائل: هل يعنى ذلك أن خط النقل ليس له Inductance لأن عدد اللفات فيه = 1 ؟ والإجابة : رغم أن عدد اللفات بالفعل صغير ويساوى 1 ، لكن مساحة مقطع هذه اللفة الواحدة ضخم جدا ، ولذا قيمة الـ Inductance معتبرة. وبسبب هذه المساحة الضخمة تكون الـ Inductance فى الخطوط الهوائية أكبر بست مرات منها فى الكابلات ، على عكس الـ Capacitance التى ستكون فى الكابلات أكبر بعشر مرات.

ملحوظة:

عند مرور التيار المتردد فى الملف فإن الملف يخزن طاقة بداخله فى نصف الدورة الموجب ، ويردها للمصدر مرة أخرى فى نصف الدورة السالب ، وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة على شدة التيار المار وعلى قيمة الـ Inductance حسب المعادلة التالية :

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

حيث الطاقة المخزنة هي W وتقاس بالجول بينما الـ Ind تقاس بالـ H Hennery,

10.3.2 تأثير الـ Inductance على الحدود القصوى لنقل الطاقة

أحد أهم القيم المطلوب تحديدها لأي خط هي أقصى قدرة فعالة P يمكن أن تنتقل خلاله بين محطتين لهما جهدان V1 و V2 كما فى الشكل 10-3 .

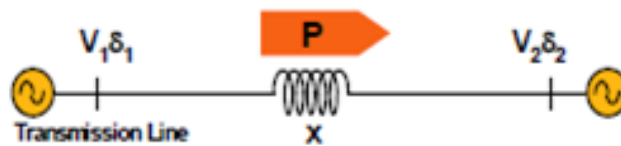


Figure 10-3 المعاملات المؤثرة على انتقال القدرة عبر خط نقل

والواقع أن هذه القدرة تتوقف أساسا على عدة عوامل. فإذا أخذنا في الاعتبار محطتين لهما جهد V_1 و V_2 مربوطتين بخط نقل القدرة له معاوقة قدرها X ، والزاوية بين جهدي المحطتين هي δ_{12} التي تعرف بالـ Power Angle ، فإن القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين المحطتين تساوى :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

ويمكن تمثيلها بالمنحنى الموجود بالشكل 10-4 والذي منه نستنتج أن القدرة المنقولة تزيد مع زيادة الزاوية بين المحطتين حتى تصل حدها الأقصى

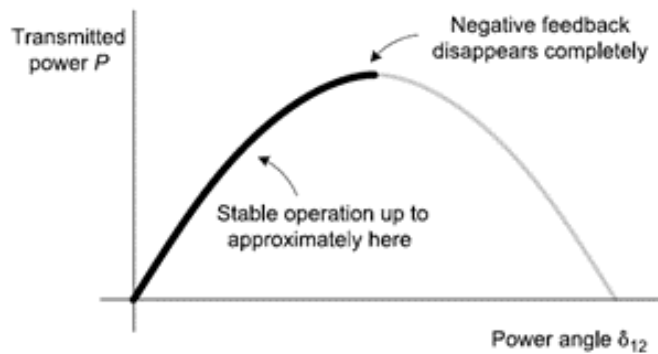


Figure 10-4 Stability margin

حين تكون الزاوية بين المحطتين تساوى 90 درجة لكن بالتأكد لن نحاول الاقتراب من هذه القيمة لأن أى زيادة طفيفة فى الزاوية بعد 90 درجة ستقلنا إلى منطقة عدم الاتزان والتي فيها تتناقص القدرة المنقولة مع زيادة الزاوية.

ومن المعادلة السابقة نستنتج أن القدرة المنقولة يمكن أن تزيد بعدة طرق منها:

- 1- زيادة جهد النقل وهذا يفسر استخدام الجهود العالية فى نقل القدرة الكهربائية بالإضافة لما نعلمه جميعا من أن رفع الجهد سيخفض قيمة التيار فى الخطوط ومن ثم يخفض قيمة Power Losses مع ملاحظة أن رفع جهد خط بعد تركيبه يعتبر شبه مستحيل لأن ذلك يستلزم تغيير كافة العوازل على طول مسار الخط .
- 2- زيادة قيمة الزاوية δ عن طريقة زيادة ضغط البخار الداخلى للتربين فى محطة التوليد لكن هناك حدود لهذه الزيادة كما ذكرنا Stability limit ويجب ألا تقترب من قيمة 90 درجة خوفا من عدم الاتزان .
- 3- ويمكن زيادة القدرة المنقولة عن طريق إنقاص قيمة X وهذا ممكن إما بإنشاء مثلا خط موازى فنقل قيمة X إلى النصف وبالتالي تزداد القدرة المنقولة إلى الضعف ، أو عمل Bundle conductors وهو أيضا ليس أمرا هينا . ويتبقى الحل الآخر وهو استخدام التكنولوجيا الجديدة المعروفة باسم FACTS كما سندرسها فى الفصل الأخير من هذا الباب للتحكم فى قيم X .

10.3.3 هل الخطوط القصيرة أفضل فى نقل الطاقة؟

فى الخطوط القصيرة ستكون قيمة X منخفضة وهذا يعنى أن القدرة المنقولة ستكون أكبر منها فى حالة الخطوط الطويلة ، لكن هذا الكلام ليس على إطلاقه ، وذلك لسببين :

- الأول أن المعادلة السابقة هي معادلة تقريبية نفترض فيها فرضاً غير واقعي وهو أن الخط Lossless أى ليس له مقاومة ومن ثم لم يظهر تأثير المقاومة فى المعادلة.
- والسبب الثانى وهو مترتب على السبب الأول وهو أن هناك عنصر آخر يجب أن يؤخذ فى الاعتبار فى هذه الحسابات وهو ما نسميه الاتزان الحرارى أو Thermal Stability.

والاتزان الحرارى يقصد به أن تكون الحرارة المتولدة داخل أسلاك النقل نتيجة مرور التيار ($I^2 R t$) تساوى أو أقل من الحرارة المتبددة من الأسلاك فى الهواء وهذا يتوقف على قيمة التيار المار بالسلك وعلى قيمة مقاومة السلك R ، وبالتالي فلا يمكن اعتبار أن القدرة المنقولة قد ارتفعت نتيجة أن قيمة X قد انخفضت فى الخطوط القصيرة ، مالم نأخذ فى الاعتبار أيضاً قيمة الـ Thermal Limit كما هو واضح فى الشكل 5-10 .

ملحوظة:

القدرة المنقولة P_{12} تظهر فى الرسم كنسبة من الـ Surge Impedance Load . ويمكن مراجعة مفهوم الـ SIL فى الفصل الأخير من هذا الكتاب.

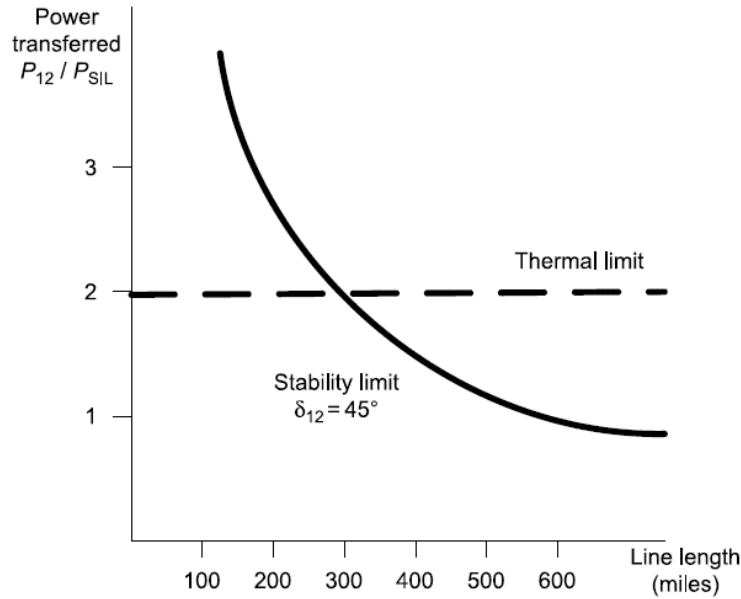


Figure 10-5 حدود قدرة الخط على نقل الطاقة

10.3.4 تأثير الـ Inductance على حدود القدرات غير فعالة

فى الجزء السابق تحدثنا عن نقل القدرة الفعالة عبر الخطوط ، لكن فى الواقع أن لدينا نوع آخر من القدرة المنقولة وهى القدرة غير الفعالة. فالقدرة الفعالة P Active Power ، هى التى تتحول فى داخل الحمل إلى نوع آخر من الطاقة مثل أن تتحول إلى طاقة حركة فى المحركات أو طاقة حرارية فى السخانات وهكذا.

أما القدرة غير الفعالة Q Reactive Power فهي قدرات تسحب من المولد في النصف الأول من موجة الجهد ثم ترجع إليه مرة أخرى في النصف الثاني ولذا تسمى أحيانا بالقدرة الاسترجاعية (أى التى ترجع مرة أخرى للمصدر) . ورغم أنها غير فعالة لأنها لا تتحول إلى صورة أخرى من صور الطاقة ، لكنها ضرورية لتغذية الدوائر المغناطيسية للمحولات والمحركات وخلافه ، فهي المسؤولة عن توليد المجال المغناطيسي اللازم لعمل هذه الأجهزة. (مزيد من التفاصيل حول القدرة غير الفعالة في الفصل التالى).

وهناك فرق جوهري آخر بين القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ، وهو أن كمية واتجاه القدرة الفعالة في أى خط يتحدد بالفرق بين الـ V_{Send} و $V_{\text{Receiving}}$ والتى سميناهما سابقا بالزاوية δ ، فكلما زادت هذه الزاوية زادت القدرة الفعالة المنقولة على الخط (بحد أقصى 90 درجة كما ذكرنا) ، كما يتحدد اتجاه مرور القدرة الفعالة بهذه الزاوية أيضا فيكون متجها من المحطة التى لها Phase angle أكبر من الأخرى ، ويتم تغيير هذه الزوايا بواسطة تغيير سرعة المولدات (راجع الباب الأول).

أما كمية واتجاه القدرة غير الفعالة فيتحدد حسب قيمة الجهد وبالتالي كلما زاد الفرق بين جهد المصدر وجهد الحمل كلما زادت القدرة غير الفعالة المارة بينهما ويكون اتجاه مرورها من الجهد الأعلى للأقل.

ومن السطرين السابقين يتبين ظهور مشكلة كبرى ، وهى أن انخفاض الجهد بسبب ارتفاع قيمة الـ Inductance سيؤدى إلى زيادة سحب القدرة غير الفعالة وهو ما سيؤدى إلى مزيد من الانخفاض فى الجهد بسبب الـ Voltage drop الناشئ عن مرور مزيد من تيارات القدرة غير الفعالة ، وربما نصل إلى مرحلة انهيار الجهد كما سنشرح ذلك تفصيلا فى الفصل التاسع والعشرين بالباب السادس .

10.4 سعة الخطوط CAPACITANCE وتأثيراتها

مرور التيار يولد مجالا مغناطيسيا يتسبب فى ظهور الـ Inductance كما سبق ، وعلى الجانب الآخر فوجود فرق جهد بين موصلين ينشأ بينهما مجالا كهربيا ، أى أن الـ Inductance ترتبط بالمجال المغناطيسى (الذى أنشأه التيار) أما الـ Capacitance فترتبط بالمجال الكهربى (الذى أنشأه فرق الجهد) . كما أن فرق الجهد بين الموصلين يتسبب فى تخزين شحنات كهربية فى الوسط العازل بينهما (فكرة المكثف) ، وهذه الكمية من الشحنات تساوى Q حيث

$$Q = CV$$

بمعنى أن كمية الشحنات المخزنة Q تتناسب طرديا مع شدة الجهد V ، وهناك ثابت للتناسب هو ما اصطلح على تسميه بالـ $\text{Capacitance, } C$ ، حيث تتوقف قيمتها على الأبعاد الهندسية بين الموصلات الحاملة للجهد وسماحية الوسط العازل لتخزين الشحنات ، وهذه السماحية Permeability يرمز لها بالرمز ϵ_0 فى حالة الهواء .

و الهواء هو أقل الأوساط العازلة سمحية للتخزين ، بينما المواد العازلة الأخرى لها سمحية تخزين تزيد عن سمحية الهواء بنسبة تساوى ϵ_r قد تصل قيمتها إلى 7 أو 8 أمثال سمحية الهواء .

والجدول التالى يعرض نماذج لقيم سمحية عوازل مختلفة مع عرض قيم الجهود التى يتحملها .

<i>Insulating material</i>	<i>Dielectric constant or relative permittivity (ϵ_r)</i>	<i>Dielectric Strength in kV/mm</i>
Air	1.0006	3.2
Asbestos*	2	2
Bakelite	5	15
Epoxy	3.3	20
Glass	5-12	12-100
Marble*	7	2
Mica	4-8	20-200
Micanite	4-5-6	25-35
Mineral Oil	2.2	10
Mylar	3	400
Nylon	4.1	16
Paper	1.8-2.6	18
Paraffin wax	1.7-2.3	30
Polyethylene	2.3	40
Polyurethane	3.6	35
Porcelain	5-6.7	15
PVC	3.7	50
Quartz	4.5-4.7	8
Rubber	2.5-4	12-20
Teflon	2	20
Vacuum	1	infinity
Wood	2.5-7	---

والمعادلة التالية تعطى علاقة الـ Capacitance بأبعاد الموصلات

$$C = \frac{0.0121\epsilon_r}{\log_{10} \frac{D}{r}} \mu F/km$$

وتسمى هذه السعات غير المرئية بالمكثفات الذاتية Self-Capacitance ، وتظهر هذه السعات طبقا للتعريف السابق بين كل Two Phases كما تظهر بين كل Phase والأرض ، وهذه الأخيرة تسمى بالمكثفات الشاردة Stay Capacitance وهى مكثفات غير مرئية وموزعة بانتظام على طول الخط ، وتتسبب فى مرور تيار متسرب من الخط إلى الأرض يسمى بالـ Stray Current أو الـ Capacitive Currents .

ومن أساسيات النقل الاقتصادي للتيار المتردد أن تكون السعة الكهربائية Capacitance بين الخط الحامل للتيار وبين الأرضي صغيرة لتقليل الفقد في الكهرباء . ويمكن تنفيذ ذلك بزيادة ارتفاع الأبراج مثلا فى الخطوط الهوائية

، أما بالنسبة للكابلات عموماً لاسيما الكابلات البحرية التي تمتد عشرات الكيلومترات فالمشكلة أصعب حيث تكون سعة الكابلات كبيرة ، وبالتالي تزداد تكلفة نقل التيار المتردد ، وفي هذه الحالة يكون النقل باستخدام التيار المستمر أوفر اقتصادياً ، حيث لا يحدث فقد كبير .

وتتوقف قيمة الطاقة المخزنة بالمكثف (W Joule) على حسب سعة المكثف ، وفرق الجهد عليه حسب المعادلة التالية:

$$W = 0.5 CV^2$$

وبسبب وجود هذه المكثفات وهذه التيارات المتسربة ظهر مصطلح جديد هو الـ Admittance, Y .

10.4.1 مصطلح الـ Admittance, Y

هي مقياس لمدى سهولة مرور التيار بالدائرة وهي عكس المعاوقة Z وبالتالي يمكن أن تسميها المساهلة ، وحتى وحدات قياسها تكون عكس وحدات قياس المعاوقة Z والتي تقاس كما نعلم بالأوم ، ويرمز لها بالـ Ω ، أما الـ Admittance فتقاس بالـ mho والرمز يكون \bar{Y} (لاحظ أن الاسم والرمز معكوسين) ، وأحياناً تقاس أيضاً بالـ Siemens

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \left(\frac{R}{R^2 + X^2} \right) + j \left(\frac{-X}{R^2 + X^2} \right)$$

Or

$$Y = G + jB$$

Where

Y is the admittance, measured in Siemens (1/ohm).

G is the conductance, measured in Siemens. Real part of admittance Y.

B is the saucepans, measured in Siemens, Imaginary part of admittance Y.

10.5 طرق تمثيل خطوط النقل رياضياً

جميع الحسابات المرتبطة بخطوط النقل تحتاج إلى تمثيل رياضي للخط ، وطريقة هذا التمثيل تتوقف على طول الخط ، حيث تقسم خطوط النقل إلى ثلاثة أنواع حسب الطول :

10.5.1 تمثيل الخطوط القصيرة :

الخطوط القصيرة Short TL ، والتي يكون طولها أقل من 80 كم ، يتم تمثيلها كـ Lumped Parameters ، أى بمعاوقة $R + jX$ مجمعة كما فى الشكل 10-6 ، حيث R تمثل المقاومة الكلية لموصلات الخط ، و X تمثل المعاوقة الحثية للخط كله ، وفى هذه الخطوط نهمل تأثير المكثفات الشاردة للخط.

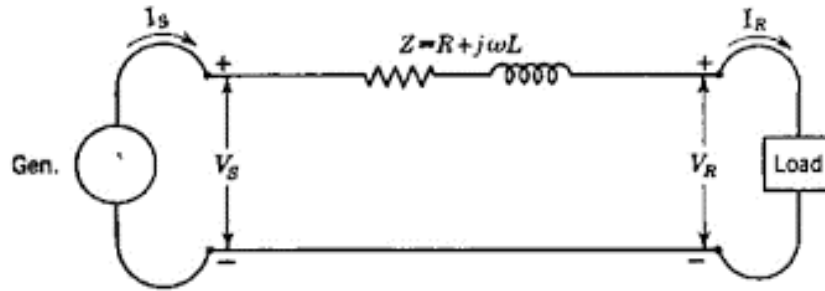


Figure 10-6 Short TL

والمثال التالى يظهر كيفية تأثير قيم عناصر التمثيل (R and L) على أداء الخط (الكفاءة وانتظام الجهد).

Example 10.3. An overhead 3-phase transmission line delivers 5000 kW at 22 kV at 0.8 p.f. lagging. The resistance and reactance of each conductor is 4 Ω and 6 Ω respectively. Determine : (i) sending end voltage (ii) percentage regulation (iii) transmission efficiency.

Solution.

Load power factor, $\cos \phi_R = 0.8$ lagging

Receiving end voltage/phase, $V_R = 22,000/\sqrt{3} = 12,700$ V

Impedance/phase, $\vec{Z} = 4 + j6$

Line current, $I = \frac{5000 \times 10^3}{3 \times 12700 \times 0.8} = 164$ A

As $\cos \phi_R = 0.8$ $\therefore \sin \phi_R = 0.6$

Taking \vec{V}_R as the reference phasor (see Fig. 10.6),

$$\vec{V}_R = V_R + j0 = 12700 \text{ V}$$

$$\vec{I} = I(\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = 164(0.8 - j0.6) = 131.2 - j98.4$$

(i) Sending end voltage per phase is

$$\begin{aligned} \vec{V}_S &= \vec{V}_R + \vec{I} \vec{Z} = 12700 + (131.2 - j98.4)(4 + j6) \\ &= 12700 + 524.8 + j787.2 - j393.6 + 590.4 \\ &= 13815.2 + j393.6 \end{aligned}$$

$$\text{Magnitude of } V_S = \sqrt{(13815.2)^2 + (393.6)^2} = 13820.8 \text{ V}$$

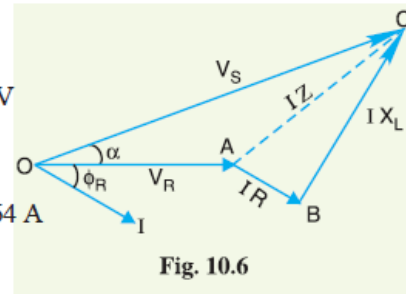


Fig. 10.6

$$\text{Line value of } V_S = \sqrt{3} \times 13820.8 = 23938 \text{ V} = \mathbf{23.938 \text{ kV}}$$

$$(ii) \quad \% \text{ age Regulation} = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 = \frac{13820.8 - 12700}{12700} \times 100 = \mathbf{8.825\%}$$

$$(iii) \quad \text{Line losses} = 3I^2R = 3 \times (164)^2 \times 4 = 3,22,752 \text{ W} = 322.752 \text{ kW}$$

$$\therefore \text{Transmission efficiency} = \frac{5000}{5000 + 322.752} \times 100 = \mathbf{93.94\%}$$

10.5.2 تمثيل الخطوط متوسطة الطول

الخطوط متوسطة الطول Medium TL ، تكون بين 80 إلى 160 كم ، وتمثل :

- 1- إما بطريقة الـ T-Section ، حيث يظهر تأثير الـ Capacitance لكن بصورة مجمعة سواء في منتصف الخط كما في الـ T-model الذي يظهر في الشكل 10-7.

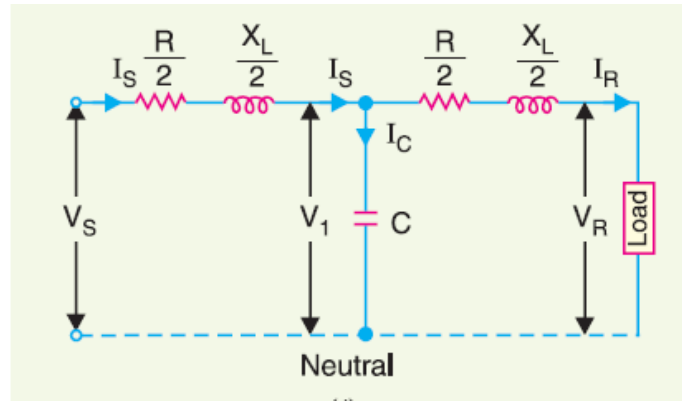


Figure 10-7 T-model for Medium length TL

- 2- أو بتقسيم المكثفات إلى نصفين (كل نصف يمثل بضعف قيمة الـ Admittance الكلية للخط) ، كما في الشكل 10-8 .

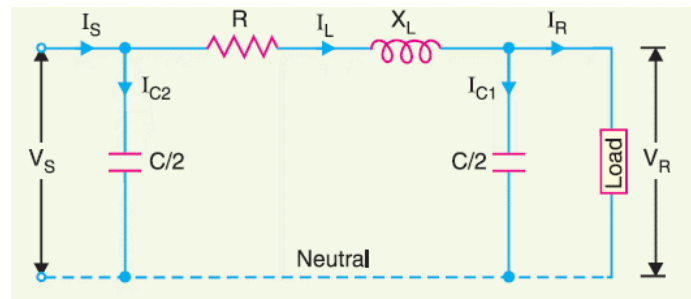


Figure 10-8 Pi-Model

وهذا مثال لحسابات أداء الخط وتأثره بقيم التمثيل (R and L and C)

Example 10.11. A 3-phase, 50-Hz overhead transmission line 100 km long has the following constants :

$$\text{Resistance/km/phase} = 0.1 \, \Omega$$

$$\text{Inductive reactance/km/phase} = 0.2 \, \Omega$$

$$\text{Capacitive susceptance/km/phase} = 0.04 \times 10^{-4} \text{ siemen}$$

Determine (i) the sending end current (ii) sending end voltage (iii) sending end power factor and (iv) transmission efficiency when supplying a balanced load of 10,000 kW at 66 kV, p.f. 0.8 lagging. Use nominal T method.

Solution. Figs. 10.13 (i) and 10.13 (ii) show the circuit diagram and phasor diagram of the line respectively.

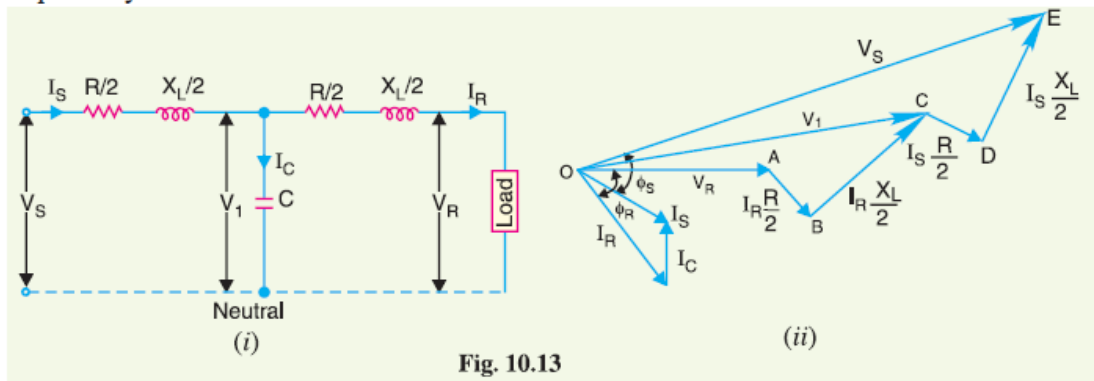


Fig. 10.13

$$\text{Total resistance/phase,} \quad R = 0.1 \times 100 = 10 \, \Omega$$

$$\text{Total reactance/phase,} \quad X_L = 0.2 \times 100 = 20 \, \Omega$$

$$\text{Capacitive susceptance,} \quad Y = 0.04 \times 10^{-4} \times 100 = 4 \times 10^{-4} \text{ S}$$

$$\text{Receiving end voltage/phase,} \quad V_R = 66,000/\sqrt{3} = 38105 \text{ V}$$

$$\text{Load current,} \quad I_R = \frac{10,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 66 \times 10^3 \times 0.8} = 109 \text{ A}$$

$$\cos \phi_R = 0.8 ; \quad \sin \phi_R = 0.6$$

$$\text{Impedance per phase,} \quad \vec{Z} = R + jX_L = 10 + j20$$

(i) Taking receiving end voltage as the reference phasor [see Fig. 10.13 (ii)], we have,

$$\text{Receiving end voltage,} \quad \vec{V}_R = V_R + j0 = 38,105 \text{ V}$$

$$\text{Load current,} \quad \vec{I}_R = I_R (\cos \phi_R - j \sin \phi_R) = 109 (0.8 - j0.6) = 87.2 - j65.4$$

$$\begin{aligned} \text{Voltage across C,} \quad \vec{V}_1 &= \vec{V}_R + \vec{I}_R \vec{Z}/2 = 38,105 + (87.2 - j65.4)(5 + j10) \\ &= 38,105 + 436 + j872 - j327 + 654 = 39,195 + j545 \end{aligned}$$

Charging current, $\vec{I}_C = j Y \vec{V}_1 = j 4 \times 10^{-4} (39,195 + j 545) = -0.218 + j 15.6$

Sending end current, $\vec{I}_S = \vec{I}_R + \vec{I}_C = (87.2 - j 65.4) + (-0.218 + j 15.6)$
 $= 87.0 - j 49.8 = 100 \angle -29^\circ 47' \text{ A}$

\therefore Sending end current = **100 A**

(ii) Sending end voltage, $\vec{V}_S = \vec{V}_1 + \vec{I}_S \vec{Z}/2 = (39,195 + j 545) + (87.0 - j 49.8) (5 + j 10)$
 $= 39,195 + j 545 + 434.9 + j 870 - j 249 + 498$
 $= 40128 + j 1170 = 40145 \angle 1^\circ 40' \text{ V}$

\therefore Line value of sending end voltage
 $= 40145 \times \sqrt{3} = 69\,533 \text{ V} = \mathbf{69.533 \text{ kV}}$

(iii) Referring to phasor diagram in Fig. 10.14,

$\theta_1 = \text{angle between } \vec{V}_R \text{ and } \vec{V}_S = 1^\circ 40'$

$\theta_2 = \text{angle between } \vec{V}_R \text{ and } \vec{I}_S = 29^\circ 47'$

\therefore $\phi_S = \text{angle between } \vec{V}_S \text{ and } \vec{I}_S$
 $= \theta_1 + \theta_2 = 1^\circ 40' + 29^\circ 47' = 31^\circ 27'$

\therefore Sending end power factor, $\cos \phi_S = \cos 31^\circ 27' = \mathbf{0.853 \text{ lag}}$

(iv) Sending end power $= 3 V_S I_S \cos \phi_S = 3 \times 40,145 \times 100 \times 0.853$
 $= 10273105 \text{ W} = 10273.105 \text{ kW}$

Power delivered $= 10,000 \text{ kW}$

\therefore Transmission efficiency $= \frac{10,000}{10273.105} \times 100 = \mathbf{97.34\%}$

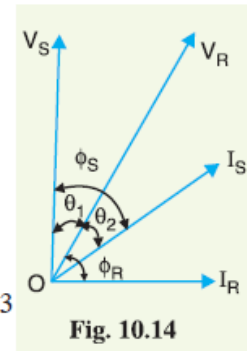
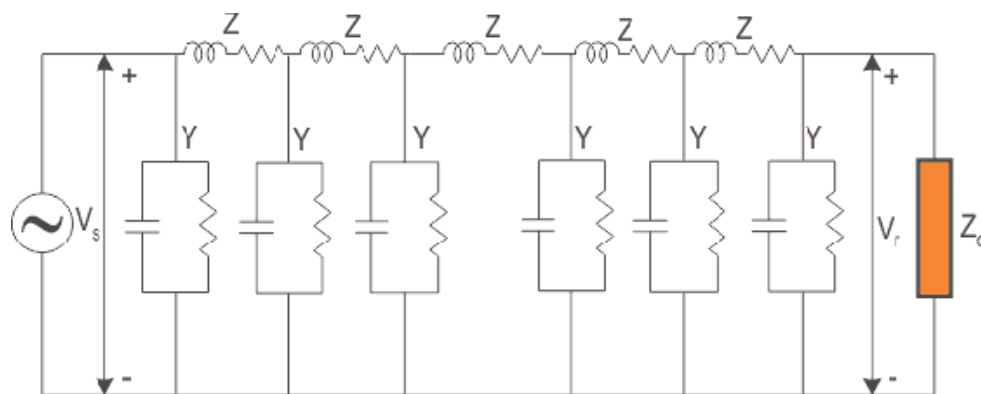


Fig. 10.14

10.5.3 تمثيل الخطوط الطويلة :

الخطوط الطويلة Long TL تكون أطول من 160 كم وتمثل بطريقة الـ Distributed parameters كما في الشكل 9-10.



Long Transmission Line Model

Figure 10-9

والمعادلات التى تصف أداء هذه الخطوط تتسم بالدقة والتعقيد الرياضى فى وقت واحد ، فالخط هنا يمثل وكأنه مجموعات لانتهائية العدد من Series Impedance, Z and Shunt Admittance, Y ، كما فى الشكل 10-9 . ويتم حساب قيم الجهد الذى يظهر على وحدة من هذه المجموعات ، ثم عمل تكامل Integration على طول الخط للوصول للجهد فى نهاية الخط .

وحيث أن الوحدة الصغيرة من هذه المجموعات تمثل بمعادلة تفاضلية من الدرجة الثانية Second Order Differential Equation ، و عند عمل تكامل لهذا النوع من المعادلات تنتج القيم المعروفة بـ Sinh and Cosh – وهما بالطبع يختلفان عن الـ Sin and Cos المعروفتان ، ومن هنا نصل للمعادلات المشهورة الممثلة لهذه الخطوط ، وهذه المعادلات تعطى قيمة الجهد والتيار عند الـ Supply End (V_S, I_S) بدلالة Z, Y للخط ، وكذلك بدلالة التيار والجهد عند Receiving End, (I_R, V_R) كما فى المعادلتين التاليتين :

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{YZ} + I_R \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{YZ}$$

$$I_S = V_R \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{YZ} + I_R \cosh \sqrt{YZ}$$

Example 10.15. A 3- ϕ transmission line 200 km long has the following constants :

$$\text{Resistance/phase/km} = 0.16 \, \Omega$$

$$\text{Reactance/phase/km} = 0.25 \, \Omega$$

$$\text{Shunt admittance/phase/km} = 1.5 \times 10^{-6} \, S$$

Calculate by rigorous method the sending end voltage and current when the line is delivering a load of 20 MW at 0.8 p.f. lagging. The receiving end voltage is kept constant at 110 kV.

Solution :

$$\text{Total resistance/phase, } R = 0.16 \times 200 = 32 \, \Omega$$

$$\text{Total reactance/phase, } X_L = 0.25 \times 200 = 50 \, \Omega$$

$$\text{Total shunt admittance/phase, } Y = j 1.5 \times 10^{-6} \times 200 = 0.0003 \angle 90^\circ$$

$$\text{Series Impedance/phase, } Z = R + j X_L = 32 + j 50 = 59.4 \angle 58^\circ$$

The sending end voltage V_S per phase is given by :

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{Y Z} + I_R \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{Z Y} \quad \dots(i)$$

Now

$$\sqrt{Z Y} = \sqrt{59.4 \angle 58^\circ \times 0.0003 \angle 90^\circ} = 0.133 \angle 74^\circ$$

$$Z Y = 0.0178 \angle 148^\circ$$

$$Z^2 Y^2 = 0.00032 \angle 296^\circ$$

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{59.4 \angle 58^\circ}{0.0003 \angle 90^\circ}} = 445 \angle -16^\circ$$

$$\sqrt{\frac{Y}{Z}} = \sqrt{\frac{0.0003 \angle 90^\circ}{59.4 \angle 58^\circ}} = 0.00224 \angle 16^\circ$$

$$\begin{aligned} \therefore \cosh \sqrt{Y Z} &= 1 + \frac{Z Y}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} \text{ approximately} \\ &= 1 + \frac{0.0178 \angle 148^\circ}{2} + \frac{0.00032 \angle 296^\circ}{24} \\ &= 1 + 0.0089 \angle 148^\circ + 0.0000133 \angle 296^\circ \\ &= 1 + 0.0089 (-0.848 + j 0.529) + 0.0000133 (0.438 - j 0.9) \\ &= 0.992 + j 0.00469 = 0.992 \angle 0.26^\circ \\ \sinh \sqrt{Y Z} &= \sqrt{Y Z} + \frac{(Y Z)^{3/2}}{6} \text{ approximately} \\ &= 0.133 \angle 74^\circ + \frac{0.0024 \angle 222^\circ}{6} \\ &= 0.133 \angle 74^\circ + 0.0004 \angle 222^\circ \\ &= 0.133 (0.275 + j 0.961) + 0.0004 (-0.743 - j 0.67) \\ &= 0.0362 + j 0.1275 = 0.1325 \angle 74.6^\circ \end{aligned}$$

Receiving end voltage per phase is

$$V_R = 110 \times 10^3 / \sqrt{3} = 63508 \, V$$

$$\text{Receiving end current, } I_R = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 110 \times 10^3 \times 0.8} = 131 \, A$$

Putting the various values in exp (i), we get,

$$\begin{aligned} V_S &= 63508 \times 0.992 \angle 0.26^\circ + 131 \times 445 \angle -16^\circ 0' \times 0.1325 \angle 74^\circ 6' \\ &= 63000 \angle 0.26^\circ + 7724 \angle 58^\circ 6' \\ &= 63000 (0.999 + j 0.0045) + 7724 (0.5284 + j 0.8489) \\ &= 67018 + j 6840 = 67366 \angle 5^\circ 50' \text{ V} \end{aligned}$$

Sending end line-to-line voltage = $67366 \times \sqrt{3} = 116.67 \times 10^3 \text{ V} = 116.67 \text{ kV}$

The sending end current I_S is given by :

$$I_S = V_R \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{Y Z} + I_R \cosh \sqrt{Y Z}$$

Putting the various values, we get,

$$\begin{aligned} I_S &= 63508 \times 0.00224 \angle 16^\circ \times 0.1325 \angle 74^\circ 6' + 131 \times 0.992 \angle 0.26^\circ \\ &= 18.85 \angle 90^\circ 6' + 130 \angle 0.26^\circ \\ &= 18.85 (-0.0017 + j 0.999) + 130 (0.999 + j 0.0045) \\ &= 129.83 + j 19.42 = 131.1 \angle 8^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

∴ Sending end current = **131.1 A**

10.6 الظواهر التي تترتب على وجود الـ CAPACITANCE في الخطوط

هناك عدة ظواهر ترتبط جميعا بوجود المكثفات الشاردة منها :

- ظاهرة Ferranti Effect
- ظاهرة ارتفاع الجهد نتيجة حدوث قصر
- ظاهرة Arcing Ground
- ظاهرة التيارات الشاردة Stray Currents

وفيما يلي نقدم شرحا لهذه الظواهر.

10.6.1 ظاهرة Ferranti Effect

هذه هي أولى الظواهر التي تنشأ بسبب الـ Stray Capacitance . معلوم أن التيار يسير من الجهد الأعلى للأقل وهذا بالضرورة يعني أن جهد المصدر لابد أن يكون دائما أعلى من جهد الحمل حتى يسير التيار من المصدر للحمل ، ولكن أحد العلماء Sir S.Z. Ferranti, in the year 1890 اكتشف ظاهرة فريدة وهي ارتفاع الجهد عند الحمل أكثر من الجهد عند المصدر ، وذلك يحدث في الخطوط المتوسطة الطول والطويلة عند انخفاض الأحمال وسميت الظاهرة باسمه Ferranti Effect

تحدث هذه الظاهرة إذا زادت قيمة التيار المسحوب بواسطة المكثفات الشاردة لخط النقل عن قيمة التيار المسحوب بواسطة الحمل في نهاية الخط (هذا بالطبع لا يمكن أن يحدث إلا عند انخفاض الأحمال بشدة على سبيل المثال

قبل صلاة الفجر مثلا) بحيث أن التيار المار في الخط يكون معظمه Capacitive currents ، وبالتالي يكون لدينا Leading current أى سابق الجهد بزاوية 90 درجة تقريبا كما في الشكل 10-10.

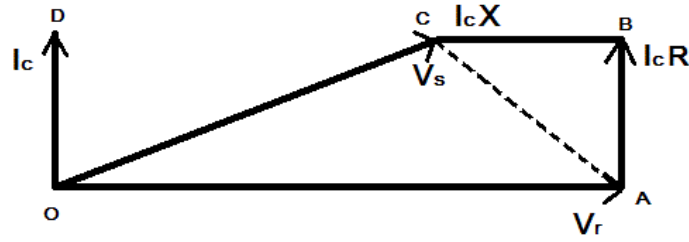


Figure 10-10 Ferranti Effect

ومعلوم أن تيار المكثف يسبق الجهد ومن ثم يصبح الـ Voltage drops على مقاومة الخط وعلى الـ Inductance كما في الشكل 10-10. مما يجعل V_s يصبح أقل من V_r وتحدث ظاهرة الـ Ferranti Effect .

بالطبع هذه الظاهرة غير موجودة في الخطوط القصيرة لصغر قيمة الـ Stray Capacitance بها.

والمعادلة التالية تعطى قيمة الارتفاع في الجهد بدلالة طول الخط والـ Inductance (لاحظ أنه الارتفاع يتناسب مع مربع طول الخط أى أنه يتأثر بشدة بقيمة المكثفات الشاردة التي تتناسب هي الأخرى مع طول الخط).

$$\text{Voltage rise} = \left(\frac{1}{2}\right) V_r \omega^2 l^2 c_0 L_0$$

تجدر الإشارة إلى أن هذه الظاهرة تكون أشد وضوحا إذا كان خط النقل عبارة عن كابلات أرضية حيث تأثير الـ Capacitance تكون أكبر بكثير من الخطوط الهوائية .

10.6.2 ظاهرة ارتفاع الجهد عند حدوث قصر

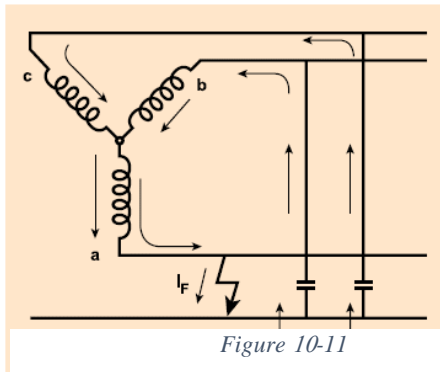


Figure 10-11

معلوم أن حدوث قصر يتسبب في ارتفاع التيار وانخفاض الجهد ، لكن هناك بعض الحالات التي يتسبب فيها القصر في ارتفاع الجهد على الـ Healthy Phases نتيجة عطل على Faulty Phase بسبب مكثفات الخط كما هو واضح في الشكل 10-11 .

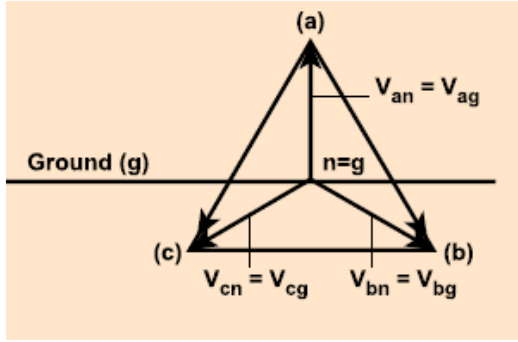


Figure 10-12

فقبل حدوث العطل كان الجهد على كل وجه يساوى Phase Voltage كما فى الـ Phasor Diagram المرسوم بالشكل 10-12 ، وبالتالي كان جهد نقطة التعادل يساوى صفرا.

ثم عند حدوث القصر يعود تيار العطل فى طريق رجوعه من خلال مكثفات الـ Healthy Phases كما فى

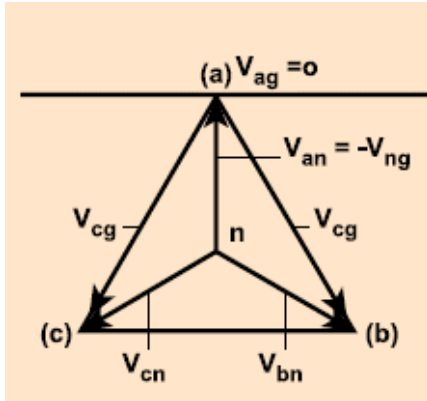


Figure 10-13

الشكل 10-11 ويرتفع جهد نقطة التعادل المعزولة إلى ما يساوى Phase Voltage (بقيمة سالبة كما فى الشكل 10-13) لأن جهد Phase-a هو الذى يساوى صفرا بعد العطل .

وبناء عليه يصبح الجهد على الـ Other two phases يساوى الـ Line voltage

$$(V_{bn} = V_b - V_n = V_b - (-V_a) = B_{ba} = V_{line})$$

أى أن عوازل الخط لهذه الـ Phases يجب أن تتحمل جهد يساوى هذا الجهد الجديد.

أما الخطوط المؤرضة فتعانى من نفس الظاهرة لكن فقط عندما تكون نقطة التعادل مؤرضة خلال مقاومة كما فى الشكل 10-14 حيث ترحزت نقطة التعادل من النقطة N إلى النقطة G وبالتالي انخفض الجهد على الـ Phase-A ليصبح $V_A - V_G$ بينما ارتفع على الفازتين الأخرين كما فى الجزء الأيمن من الشكل.

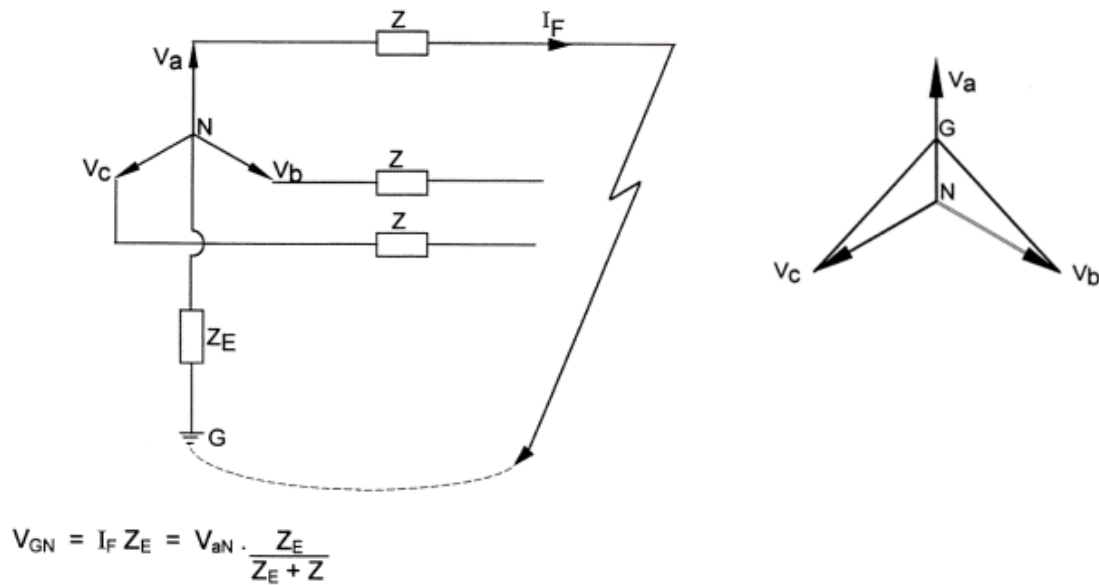


Figure 10-14 زحزة نقطة التعادل لأعلى

ويترتب على ظهور هذا الجهد ليس فقط تأثر العوازل بل هناك ما هو أسوأ وهو ظاهرة الـ Arcing Ground.

10.6.3 ظاهرة القوس الأرضي Arcing Ground

تحدث هذه الظاهرة عند سقوط خط يحمل جهداً على الأرض في نظام معزول (نقطة التعادل غير مؤرضة) ، فعند حدوث عطل أرضي على أحد الـ phase فإن المسار الوحيد لمرور تيار العطل ليكمل closed circuit هو الـ capacitance الخاصة بالخطوط كما في الشكل 10-11 السابق .

ولعل بعضنا قد رأى يوماً خطاً كهربياً يقفز في الهواء وكان شخصاً يمسك بطرفه ويحركه لأعلى وأسفل ، وبالطبع لا أحد يمسك به وإنما كل ما حدث أن الخط بمجرد أن يقترب من الأرض تنكسر عازلية الهواء بينه وبين الأرض بسبب قرب المسافة فيحدث تفريغ لشحنات المكثفات الشاردة على الـ Healthy Phases وترى بعينك شرراً بين السلك والأرض ، ثم يسقط السلك على الأرض فيمر تيار القصر المرتفع الخاص بالوجه المعطل إلى الأرض فيتناثر مع الأرض حسب شدة التيار ثم يتكرر الوضع .

وقد لا يكون تيار العطل عالياً بسبب مقاومة الأرض – بل غالباً سيكون تيار العطل صغيراً جداً لارتفاع معاوقة هذه المكثفات ، ومن ثم يمكن للنظام أن يستمر في العمل في وجود هذا العطل لفترة ، ونقول أننا في حالة system floating ، لكن تيار العطل الصغير هذا يكون كافياً كي تعود المكثفات إلى الشحن مرة أخرى بعد تناثر السلك مع الأرض وارتفاعه لأعلى ، ويتكرر الوضع بين شحن وتفريغ للمكثفات ولا يستقر السلك على الأرض بل يقفز عشوائياً في كل الاتجاهات طالما أن السلك لا يزال متصلاً بمصدر الطاقة وطالما أن الـ CB لم يفتح الدائرة.

وأخطر مافى هذه الظاهرة – بالإضافة للخطر على البشر – هو أن ينتج عنها ارتفاع فى الجهد على الخط يصل إلى 5 أمثال جهد الخط مما قد يتسبب فى انهيار العوازل.

وبسبب وجود احتمال لحدوث ارتفاع كبير في الجهد $over\ voltage$ ، فإن هذه الجهود العالية يمكن أن تؤدي لحدوث عطل أرضي آخر على عوازل برج آخر ، ومن ثم ينشأ مسار جديد يسمح بمرور تيار العطل الأول خلاله لكنه يتميز بمقاومة منخفضة هذه المرة مقارنة بمقاومة المكثفات الشاردة التي كان يمر خلالها قبل حدوث العطل الثانى ، ومن ثم ترتفع قيمة تيار العطل الأول بشدة ، ويتسبب في مخاطر كبرى ، ولذلك تكون تكلفة الصيانة أحيانا في هذا النوع من الأعطال مرتفعة جدا .

والحل الوحيد لهذه الظاهرة هو إيجاد مسار لمرور تيار العطل بدلا من المرور على المكثفات كما فى النظم المؤرضة عند نقطة التعادل حيث أن الدائرة للعطل ستكمل بعيدا عن مكثفات الـ Phases السليمة.

11

تقنيات معوضات القدرة غير الفعالة

Reactive Power Compensators

فى بدايات شبكات الكهرباء لم يكن هناك حاجة لاستخدام ما يعرف الآن باسم الـ Static VAR Compensators بأنواعها المتعددة ، إذ كانت الأحمال مجاورة للتوليد ولا يوجد أحمال حثية كثيرة ، بل كانت معظم الأحمال إما إنارة أو تسخين ، وكانت الأحمال تتصل بخطوط قصيرة بالمصدر ، ومن ثم فلم يشعر أحد بمشاكل الـ Reactive Power والتي ظهرت مع تغير هذه الظروف فصارت لدينا أحمال حثية ضخمة تحتاج لسحب كميات هائلة من الـ Q قد لا تستطيع المولدات الموجودة فى الخدمة إمداد الأحمال بها ، لأن زيادة القدرة الغير فعالة المولدة من المولد تعنى نقص القدرة الفعالة ، وبالتالي نقص الـ Power factor كما هو واضح من العلاقة المشهورة بين $P-Q$ curve والتي ستظهر لاحقا فى الشكل 11-9 ، ومن ثم نلجأ إلى المصدر الآخر للقدرة غير الفعالة وهو إما باستخدام المكثفات ، أو باستخدام أجهزة الـ STATCOM .

11.1 مفاهيم أساسية

وقبل الحديث عن هذه الأجهزة نراجع باختصار بعض المعلومات الأساسية المتعلقة بالقدرة غير الفعالة فى الخطوط (يمكن تجاوز هذا الجزء لبعض المهندسين حيث المحتوى يمثل بالنسبة لهم معلومات أولية).

11.1.1 تمثيل الأنواع المختلفة للقدرة الكهربائية

معظم الأجهزة الكهربائية التى تعمل على التيار المتردد (مثل المحركات والمحولات و...) تستهلك نوعين من الطاقة الكهربائية :

- 1- الأولى قدرة فعالة (Active Power) وتقدر بالـ (kW) وهذه يستهلك جزء صغير منها عبر المقاومة الأومية (R) للملفات ، والجزء الأكبر يتحول فعليا إلى طاقة أخرى مفيدة (حركية مثلا خلال المحركات أو ضوء كما فى اللمبات وهكذا) ، ولذا تسمى بالقدرة الفعالة أو الحقيقية.

2- والثانية قدرة غير فعالة (Reactive Power) وتقدر بالـ(KVAR) وهذه لا تستهلك ولا تتحول لصورة أخرى بل تتردد ذهابا وإيابا بين المصدر وبين الحمل من خلال خطوط التوصيل بينهما وتقوم داخل الحمل بمهمة إنشاء المجال المغناطيسي المطلوب لعمل هذه الأجهزة.

3- وعند جمع هاتين القدرتين اتجاها ينتج لدينا القدرة الظاهرية (S) Apparent Power وتقدر بالـ(KVA) كما في المثلث المعروف بمثلث القدرة شكل 11-1.

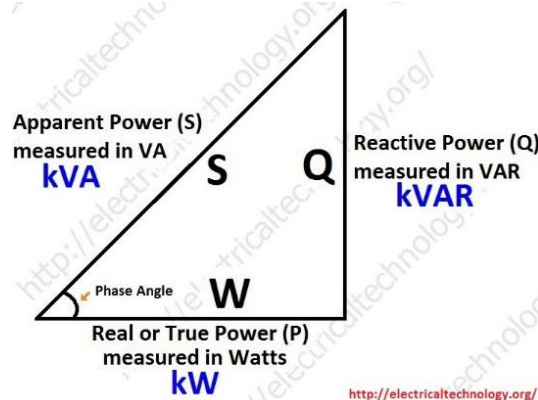


Figure 11-1 مثلث القدرة

ويمكن تقريب الأمر بصورة توضيحية ، فلو تخيلنا أن لدينا صندوقا مغلقا به حمل كهربى Electric load ومتصل به سلكان يمر خلالهما التيار الكهربى ، فلو أنك باستخدام Multi-meter قمت بقياس الجهد والتيار الداخلين للجهاز ثم حسبت حاصل ضربيهما فستحصل على ما نسميه القدرة الظاهرة Apparent Power ، وتعنى كما نقول باللغة الدارجة أن الظاهر أن القدرة الداخلة لهذا الجهاز المغلق تساوى كذا VA ، وهذا مصطلح دقيق لأنها فعلا قدرة ظاهرية أما الواقع فإنها داخل هذا الصندوق ستتقسم إلى جزئين ليس بالضرورة أن يكونا متساويين أحدهما يمثل القدرة الفعالة P والآخر يمثل القدرة غير فعالة Q ، والنسبة بينهما تحدد ما يعرف بالـ Power Factor.

11.1.2 مفهوم معامل القدرة Power Factor

فى مثلث القدرة تسمى الزاوية بين الـ P وبين الـ Q بزاوية القدرة Power Angle ويكون \cos هذه الزاوية مساويا لنسبة القدرة الحقيقية أو الفعالة (P) إلى القدرة الظاهرية (S) ، وهو ما يسمى بمعامل القدرة Power Factor .

وكلما كانت Q أقل كلما كانت زاوية القدرة صغيرة وهذا يعنى أن معامل القدرة سيكون كبيرا ويقترّب من الواحد وبالتالي تكون القدرة الفعالة المفيدة المستهلكة أكبر وهذا ما نسعى إليه. وكلما كانت Q كبيرة كلما كان معامل القدرة صغيرا وهذا يعنى أننا لن نحصل سوى على قدرة حقيقية فعالة إلا بقدر صغير من إجمالي القدرة الظاهرة S التى تغذى الحمل. ومن هنا كان معامل القدرة PF مؤشرا على ارتفاع كفاءة الاستفادة من القدرة المتاحة على

الشبكة تماماً كما لو تخيلنا زاوية الحبل الذى يشده الحصان فى الشكل 11-2 ، فكلما اقتربت الزاوية من الصفر كلما استفدت من قوة الحصان بأقصى صورة بينما لو جعلت الزاوية 90 درجة فلن تتحرك العربة ولن تحصل على أى قوة من الحصان.

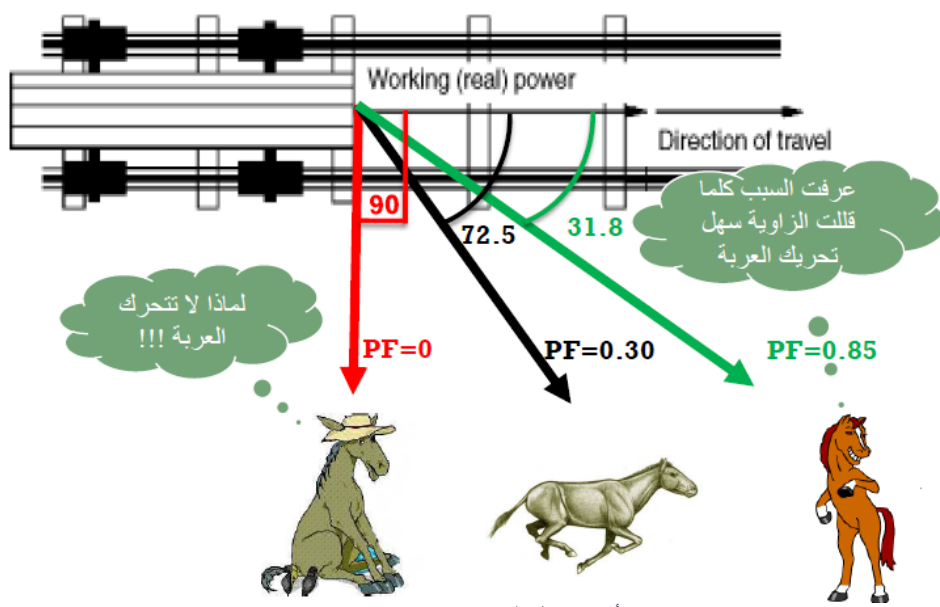


Figure 11-2 تأثير معامل القدرة

وعند إعداد دراسة لإنشاء محطة توليد أو محطة توزيع بقدرة مثلاً (1000kVA) لتأمين التغذية الكهربائية لمنطقة عامل القدرة لها بحدود (P.F=0.8) فإن المولد أو المحول سيكون قادراً على تأمين قدرة فعالة قدرها فقط (P=0.8X1000=800 KW) لأنه سيحتاج لتأمين النوع الثانى من القدرة وهو القدرة غير فعالة.

أما عندما يكون معامل القدرة بحدود (P.F=0.5) فإن هذه المولد أو المحول لن يكون قادراً إلا على تأمين قدرة فعالة فقط بحدود (P=500KW).

11.2 القدرة غير فعالة Reactive Power

هذا المصطلح يظهر دائماً إذا كانت الأحمال التى لديك تشتمل على مكثفات أو ملفات ، أما إذا كانت الأحمال عبارة عن مقاومات فقط فعندها لن يكون لدينا سوى نوع واحد من القدرة وهو القدرة الفعالة Active Power أو أحياناً تسمى القدرة الحقيقية Real Power .
ففى حالة الـ Resistive Loads يكون الجهد والتيار In-phase كما فى الشكل 11-3، ومن ثم يكون حاصل ضربيهما وهو القدرة ($P = V.I$) موجبا دائماً كما فى الشكل .

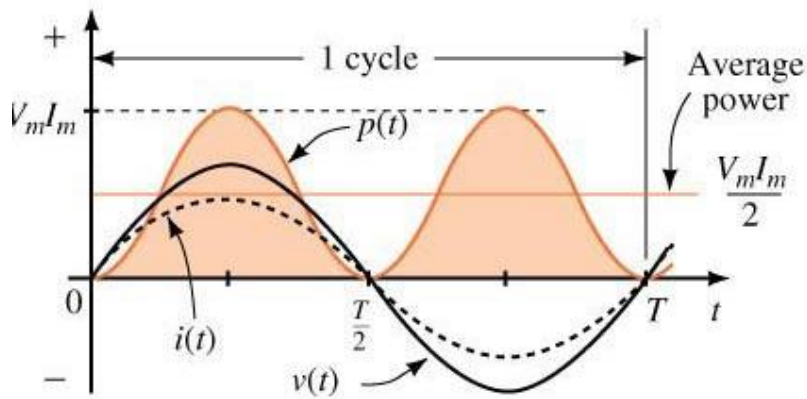


Figure 11-3 الجهد والتيار في مقاومة أومية

ويمكن القول أن كل القدرة الكهربائية القادمة من المصدر قد تحولت إلى قدرة فعالة Active داخل الحمل ، فقد تكون تحولت مثلا إلى حرارة أو إلى ضوء أو أى صورة من صور تحويل الطاقة.

أما في حالة وجود ملفات فقط أو مكثفات فقط في الدائرة الكهربائية الموصلة على مصدر للتيار المتردد فإن هناك Phase Shift بين الجهد والتيار قدرة 90 درجة (التيار يسبق Lead الجهد في حالة المكثفات ، ويكون متأخرا عنه Lag في حالة الملفات).

ونتيجة هذا الـ Phase Shift فإن حاصل ضرب الجهد في التيار تصبح موجبة في أول ربع دورة في حالة الملفات ثم سالبة ثم موجبة ثم سالبة في الربع الأخير كما في الشكل 11-4. والعكس صحيح في حالة المكثفات كما في الشكل 11-5 .

وهذا يعنى أن المكثف / الملف يخزن الطاقة المسحوبة من المصدر خلال ربع الدورة ثم يردها ثانية للمصدر خلال ربع الدورة التالي ، ويتكرر ذلك خلال ربعي الدورة الثالث والرابع . وتصبح متوسط القدرة P المسحوبة خلال دورة كاملة يساوى صفرا.

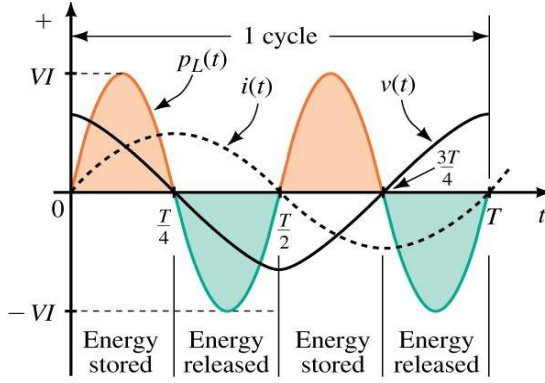


Figure 11-4 الجهد والتيار والقدرة في الملفات

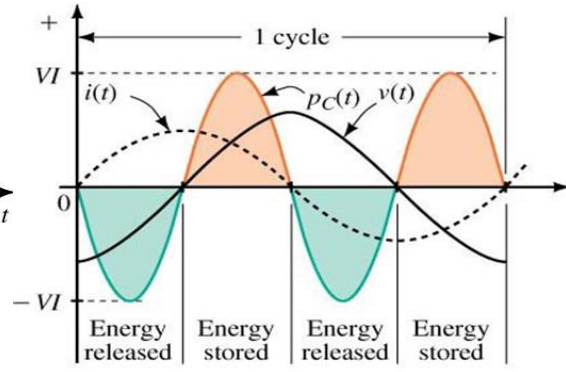


Figure 11-5 الجهد والتيار والقدرة في المكثفات

و كما هو واضح من الشكلين فإن متوسط القدرة P المسحوبة من المصدر خلال دورة كاملة يساوي صفراً في حالتى المكثف والملف ، ومن هنا أطلق على هذا النوع من القدرة التى تسحب بواسطة ملفات أو مكثفات اسم القدرة غير فعالة Q Reactive Power ، لأنها فى الإجمال لم تؤد أى شغل ولم تتحول إلى أى صورة أخرى مفيدة بل كل مافعلته (فى الظاهر حتى الآن) أنها تمر خلال الأسلاك بين المصدر والحمل ذهاباً وإياباً متنسبة فى مرور تيار إضافى فى الأسلاك وهذا التيار الإضافى سيتسبب فى حدوث Voltage drop على الخط ومن ثم ينخفض الجهد عند الأحمال ، بالإضافة إلى تسببها فى حدوث فقد فى الطاقة خلال مقاومة الأسلاك الواصلة للحمل (لاحظ أن القدرة الفعالة الوحيدة التى ظهرت هى القدرة المفقودة فى الأسلاك ولا علاقة لها بالملفات أو المكثفات).

وأحياناً يطلق على الـ Q القدرة السالبة أو التخيلية والسبب واضح من الأشكال السابقة ، ففي حالة القدرة الفعالة P Active Power ، فإن القدرة متغيرة القيمة لكنها دائماً موجبة بينما فى حالة القدرة غير فعالة Q فإن جزء منها موجب والجزء الآخر سالب كما فى الشكل 11-4 و 11-5 ، وبالتبع ليس معنى القدرة السالبة أو التخيلية أنها غير موجودة بالواقع ، بل يعنى أن اتجاهها قد تغير ليصبح من الحمل إلى المصدر .

بالتبع لا يوجد فى الواقع العملى أحمال عبارة عن ملفات فقط أو مكثفات فقط وإنما يكون مع كل منهم مقاومة ما ، ومن ثم فالقدرة المسحوبة بواسطة الملف أو المكثف لن تكون كلها Q كما فى الشكل السابق بل سيكون جزء منها يعتبر P وجزء آخر يعتبر Q وتختلف نسبة كل جزء منهما حسب نوع الحمل . والشكل 11-6 يمثل الصورة الواقعية للقدرة الفعالة وغير الفعالة المسحوبة بواسطة حمل مكون من ملف ومقاومة .

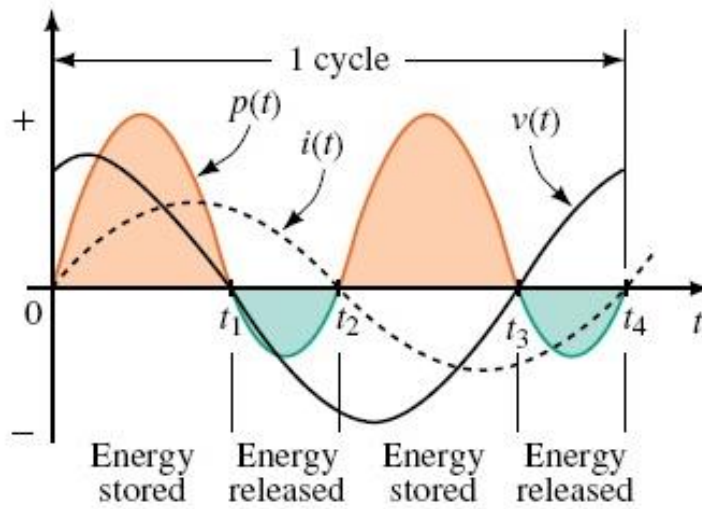


Figure 11-6

11.2.1 هل القدرة غير فعالة لأفائدة لها؟

كما ذكرنا فإن القدرة غير فعالة ليس لها فائدة مباشرة كما يبدو في الظاهر، فهي تتردد ذهاباً وإياباً بين المصدر والحمل ومن ثم تتسبب في حدوث هبوط في الجهد بسبب تيار القدرة غير فعالة المار بالخط ذهاباً وإياباً، ولكن القدرة غير الفعالة أساسية لعمل الكثير من الأجهزة، فهي المسؤولة عن توليد المجال المغناطيسي الضروري واللازم لعمل المحركات أو المحولات والمولدات. ويمكن فهم إشكالية أنها مفيدة ولكن بصورة غير مباشرة من الأمثلة التالية.

فالعربة تحتاج لقوة دفع أمامية (وهو ما يكافئ P) لكن لو صرفنا جزءاً من قوتنا لرفع العربة لأعلى قليلاً (وهو ما يكافئ Q) فسيكون دفع العربة أسهل كثيراً (شكل 11-7). وهذا بالفعل دور الـ Q فهي في هذا المثال لا تدفع العربة ولكن تساعد في دفعها، وهي كهربياً لا تتحول إلى قدرة ملموسة (حركة مثلاً في المحركات) ولكنها تساهم في إنتاج هذه الحركة من خلال إنتاجها للمجال المغناطيسي والذي بدوره لن يتحرك الموتور.

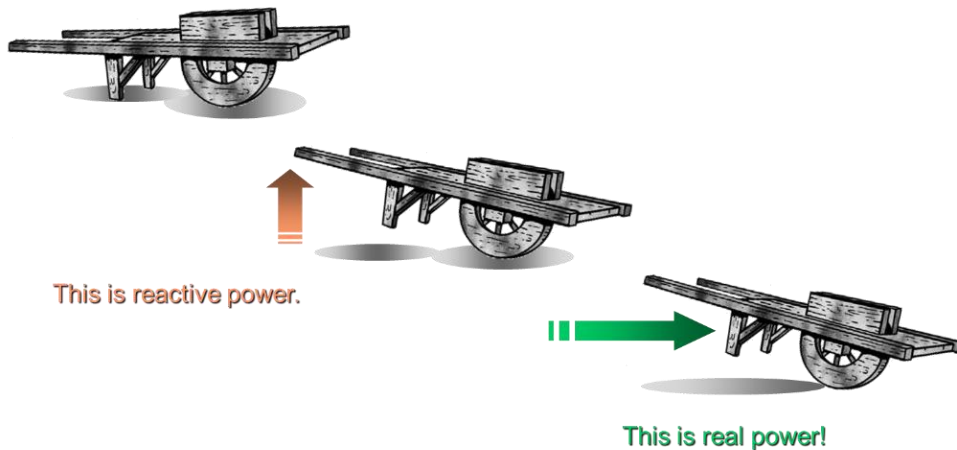


Figure 11-7 تأثير القدرة غير الفعالة

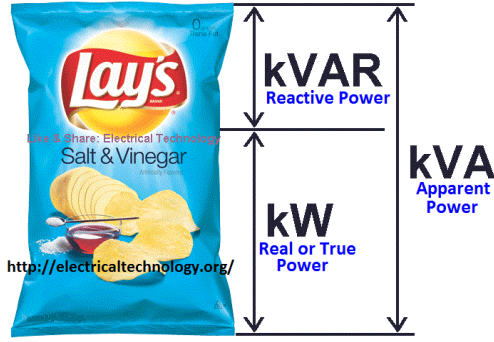


Figure 11-8

وهناك مثال طريف آخر لشرح مفهوم القدرة غير فعالة من خلال كيس الشيبسى فى الشكل 8-11 .
فالجزء الفعال أو المفيد هو الجزء السفلى المحتوى على رقائق البطاطس ، لكن الشركة مضطرة أن تضيف جزءا فارغا مملوءا بالهواء (فعليا يملأ بالنتروجين حتى لا تصبح القطع لينية) ، فهذا تماما هو دور القدرة غير فعالة لا تفيد مباشرة لكنها ضرورية بصورة غير مباشرة.

11.2.2 إنتاج واستهلاك الـ Reactive Power

جميع المعدات الكهربائية التى تحتوى على ملفات تعتبر مستهلكة للـ Q مثل المحركات والمحولات . أما المعدات التى تنتج الـ Q فهما نوعان : الأول هو المولدات Synchronous Generators والثانى هو المكثفات.

- علما بأن المولدات يمكن أن تكون منتجة للـ Q إذا كان فى حالة Over Excited ، كما يمكن أن تكون مستهلكة للـ Q فى حال كونها Under excited . (شكل 9-11)
- أما خطوط النقل / كابلات فهى تعتبر مستهلكة للـ Q فى حال كونها محملة Loaded بأعلى من Surge Impedance Load, SIL وتعتبر منتجة للـ Q إذا كان تحميلها خفيف وأقل من SIL كما سنشرح لاحقا فى الباب السادس. ونعرض ملخصها هنا:

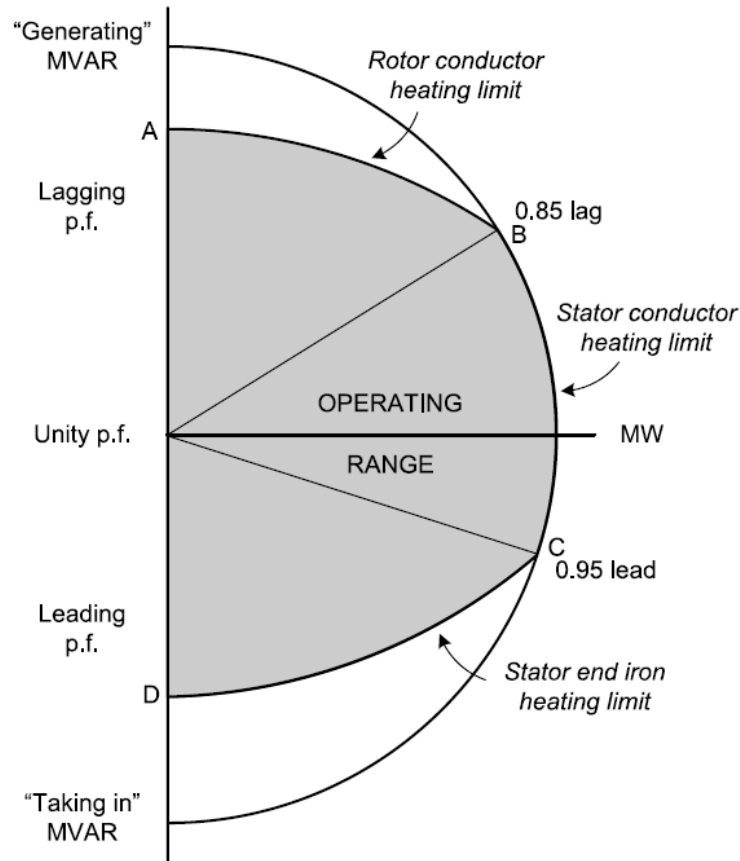


Figure 11-9 Generator P-Q curve with different PF

واضح من الشكل السابق أنه كلما انخفض معامل القدرة كلما كانت لدينا مشكلة أكبر في التحمل الحرارى للـ rotor بسبب ارتفاع قيمة الـ Reactive power التى تتولد فيه ، وهذه صورة أخرى من صور مساوئ معاملات القدرة المنخفضة.

11.2.3 دور القدرة غير الفعالة في خطوط النقل

المعادلة التالية تمثل قيمة القدرة غير الفعالة الواصلة عند طرف Receiving end

$$Q_r = \frac{V_s V_r}{X_1} \cos \theta - \frac{V_r^2}{X_1}$$

حيث θ هي نفسها δ في المعادلة المشهورة وتمثل الزاوية بين الجهدين في طرفى خط النقل. و X_1 هي reactance of the transmission line

ومن المعادلة السابقة يمكن أن نصل إلى علاقة الـ Reactive Power بالجهد كما يلي:

$$V_r^2 - V_s V_r + X_l Q_r = 0$$

وهى معادلة من الدرجة الثانية تعطى حلين أحدهما مرفوض ، والثانى يظهر فى المعادلة التالية:

$$V_r = \frac{V_s - \sqrt{V_s^2 - 4 \cdot X_l \cdot Q_r}}{2}$$

فإذا اعتبرنا أن

$$Q_r = Q_1 \text{ (Demand)} - Q_2 \text{ (supplied)}.$$

فسيكون لدينا 3 احتمالات:

- الأول: أن تكون $Q_2 \text{ (supplied)} = Q_1 \text{ (Demand)}$ ، فى هذه الحالة سيكون $V_s = V_r$ وهو المطلوب.
- الثانى: أن تكون $Q_1 \text{ (Demand)} > Q_2 \text{ (supplied)}$ ، فى هذه الحالة سيكون $V_s > V_r$ وهو الأكثر شيوعا ، وسنحتاج لطرق معينة لرفع هذا الجهد عند الأحمال.
- الثالث : أن تكون $Q_1 \text{ (Demand)} < Q_2 \text{ (supplied)}$ ، فى هذه الحالة سيكون $V_s < V_r$ وهذا يحدث عند التحميل الخفيف وهى غير مرغوب فيه لخطورته ، وسيعالج باستخدام الـ Shunt Reactors كما سنرى لاحقا.

معلومة :

من أجل تحسين معامل القدرة والتحكم فى قيمة القدرة غير الفعالة بلغ إجمالى السعات المركبة حتى صيف 2014 على الجهود المتوسطة والمنخفضة فى مصر حوالي 9635 ميجا فار ، بالإضافة إلى 800 ميجا فار على شبكة الجهد الفائق 220 ك فولت ، ونتيجة لذلك فقد بلغ معامل القدرة بالشبكة الموحدة حوالي 92% ومن المستهدف الوصول إلى 94% .

11.3 ماهو مفهوم الـ Surge Impedance Loading, SIL ؟

معلوم أن خط النقل يولد Reactive Power من خلال مكثفات الخط الطبيعية Self-Capacitance وكمية الـ Q المنتجة بواسطة هذه المكثفات تساوى

$$MVAR \text{ (Produced)} = \frac{kV^2}{X_C}$$

أيضا هذه الخطوط تحتاج لسحب Reactive Power لتوليد المجال المغناطيسي المصاحب للخط من خلال الـ Self-Inductance الخاصة بالخط ، وهذه القدرة الغير فعالة المسحوبة تساوى $I^2 X_L$.

وعندما تكون $Q (used) = Q (Supplied)$ فهذا يعنى أن

$$I^2 X_L = \frac{V^2}{X_C}$$

ومنها نجد أن

$$X_L X_C = \frac{V^2}{I^2}$$

ومنها نحصل على العلاقة المعروفة

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Surge Impedance} = Z_0$$

إذن فالحالة السابقة عندما تكون $Q (used) = Q (Supplied)$ لا تتحقق إلا إذا كانت معاوقة النظام تساوى Z_0 ، وتسمى الـ C/C Impedance ، والتي تتراوح قيمتها بين 400 - 600 أوم فى خطوط النقل بينما تصل إلى 40-60 أوم فى الكابلات.

والأهمية النظرية لهذا المصطلح أنه إذا تم توصيل حمل Pure resistance فى نهاية الخط وكانت قيمته تساوى نفس قيمة الـ C/C Impedance للخط فعندها سيكون الجهد عند الحمل مساويا تماما للجهد عند المصدر دون أى هبوط فى الجهد. وأيضا فى هذه الحالة سيكون قيمة التيار المسحوب من الحمل تساوى

$$|I_L| = \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

وإذا ضربنا طرفى المعادلة السابقة فى $\sqrt{3}V$ سنحصل على قيمة الـ SIL كما يلى

$$SIL = \sqrt{3}|V| \frac{|V|}{\sqrt{3} * \sqrt{(L/C)}}$$

$|V|$ in kVs

$$SIL = \frac{|V|^2}{\sqrt{(L/C)}} \quad \text{MW}$$

11.3.1 أهمية قيمة الـ SIL

الرقم الممثل للـ SIL له أهمية كبرى لمهندسي التشغيل ، فالرقم أولاً نحصل عليه بسهولة ، فأنت لا تحتاج سوى معرفة جهد الخط وقيمتى الـ L and C حتى تحسب قيمة الـ SIL. فما أهمية هذا الرقم؟

أهمية هذا الرقم تظهر من المنحنى شكل 10-11 . حيث يتبين من هذا المنحنى أنه إذا تم تحميل الخط بحمل أقل من SIL فهذا يعنى أن الخط يعمل كأنه Shunt Capacitor أى يعطى Q بينما إذا تم تحميل الخط بحمل أكبر من الـ SIL فمعناه أن الخط يعمل كأنه Shunt Reactor أى أنه يسحب قدرة غير فعالة.

فى الشكل 10-11 يفترض أن لدينا خط له $SIL = 450MW$ فإذا تم تحميل الخط بحمل قدرة 450 MW بالضبط فهذا بمعنى آخر أن القدرة غير الفعالة المولدة بواسطة مكثفات الخط تساوى تماماً القدرة غير الفعالة التى يحتاجها الخط ، فإذا زاد التحميل عن هذه القيمة فإن الخط سيحتاج لسحب Q من أى مصدر (سواء المولد نفسه أو من مكثفات مساعدة كما سنرى) .

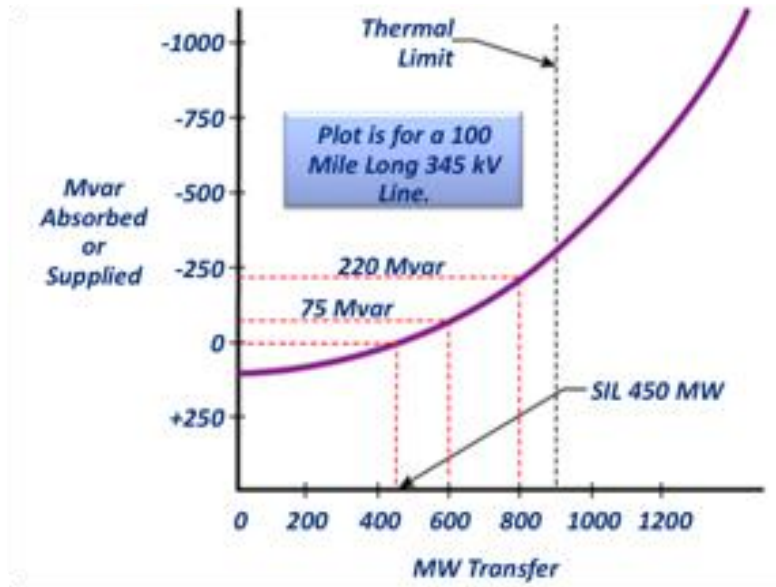


Figure 11-10 Power Limits according to SIL

ومن هنا تظهر أهمية هذا الرقم بالنسبة لمشغل الشبكة ، أنه يستطيع بسرعة وبحسابات بسيطة تقدير القدرة غير الفعالة المطلوبة ، فعلى سبيل المثال لو فرضنا أن الـ C/C Impedance لخط ما تساوى 400Ω وكان جهده يساوى 110 kV فهذا يعنى أن الـ $SIL = 30MW$ ، وبالتالي فإن الـ Operator يكون عنده إمكانية تقدير طبيعة عمل الخط حسب نسبة تحميله ، وهل هى مثلاً أعلى أم أقل من الـ SIL المحسوبة ، وبالتالي هل الخط يسحب أم يعطى قدرة غير فعالة كما رأينا فى المنحنى السابق.

11.4 معوضات القدرة غير فعالة

بدلاً من جعل الـ Q تسير على الخط الناقل بين المصدر والحمل فإننا نركب أجهزة بتقنيات متنوعة لنحصل منها على الـ Q المطلوبة عند الحمل مباشرة بدلاً من الحصول عليها من مصدر القدرة ، وهذا يعني أن الخط الواصل بين المصدر والحمل سيصبح مخصصاً للقدرة الفعالة فقط وبالتالي تتحسن مشكلة الهبوط في الجهد . إضافة إلى أن المصدر لم يعد مطالباً بإمداد الحمل بالـ Q وهذا سيجعل $S = P$ ومن ثم يمكن تغذية أحمال أخرى.

وقد ظهرت هذه التقنيات مع ظهور ما يسمى بـ Flexible AC Transmission System, FACTS ، أو منظومة نقل التيار المتردد المرنة ، وهي ببساطة مجموعة تقنيات (أجهزة) متنوعة تعتمد على استخدام معدات إلكترونية عالية القدرة high Power مثل الـ SCR وذلك مع أساليب التحكم المتطورة من أجل التحكم أساساً في القدرة غير الفعالة بالإضافة للتحكم أيضاً في القدرة الفعالة وقيمة الـ X وقيمة الـ Phase Angle بين المحطات .

11.4.1 الفرق بين مرور الـ P و مرور الـ Q في الخطوط

في الشكل 11-12 نموذج مبسط لخط نقل

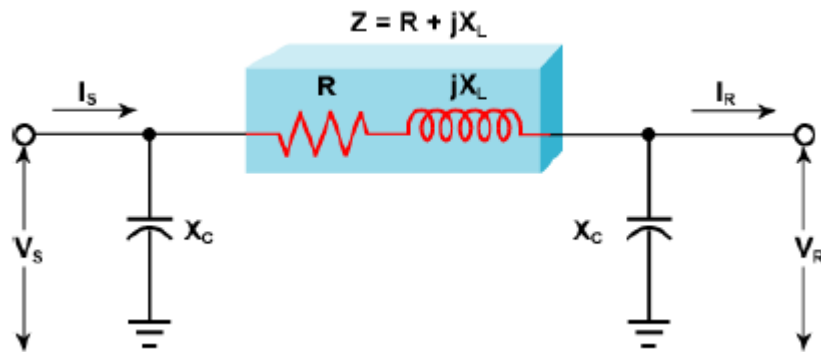


Figure 11-11

فإذا فرضنا أن مقاومة الخط مهملة ، فإن القدرة الفعالة وغير الفعالة المولدة من المصدر ، والمستقبلية بواسطة الأحمال تمثل بالمعادلات التالية:

$$P_S = \frac{V_S \times V_R}{X_L} \sin \delta$$

$$P_R = \frac{V_S \times V_R}{X_L} \sin \delta$$

$$Q_S = \frac{V_S^2 - V_S V_R \cos \delta}{X_L} - \frac{V_S^2}{X_C}$$

$$Q_R = \frac{-V_R^2 + V_S V_R \cos \delta}{X_L} + \frac{V_R^2}{X_C}$$

ومن هذه المعادلات يتبين:

- 1- أن القدرة الفعالة الصادرة من المصدر والقدرة الواصلة للحمل متساويتان (بإهمال مقاومة الخط)
- 2- أن هناك فرق بين القدرة غير الفعالة الصادرة والواصلة حيث $Q_R < Q_S$
- 3- لا يمكن نقل الـ Q لمسافات طويلة على الخطوط حيث تتميز هذه الخطوط بارتفاع نسبة X/R وهذا يعنى أن الخطوط نفسها صارت "Big Sink" أى تبتلع كمية كبيرة من الـ Q حيث $I^2 X$ المستهلكة فى الخط كبيرة جدا وبالتالي صارت كفاءة النقل ضعيفة جدا.
- 4- يترتب على الملاحظة السابقة أن الحل الوحيد لتعويض القدرة غير الفعالة هو استخدام تقنيات لمعوضات محلية عند نقاط الأحمال.

11.4.2 أهداف من استخدام هذه التقنيات :

- 1- زيادة القدرة المنقولة من القدرة الكهربائية لتصل إلى الحدود القصوى لتحمل الحرارى لتلك الخطوط وذلك جعلها مخصصة فقط لنقل القدرة الفعالة ، وبدون أن تحملها بالقدرة غير الفعالة . وهذا يعنى عدم الحاجة لإضافة خطوط جديدة قد تحتاج لأراضى وأبراج وموصلات وخلافه.
 - 2- تحسين الجهود عند نقاط الشبكة المختلفة .
 - 3- التحكم فى مسارات القدرة دون الاضطرار لإنشاء محولات Phase Shifting مثلا .
- هذه الأجهزة تتركب على خطوط نقل القدرة ذات التيار المتردد فتساهم بمرونة وسلاسة فى التحكم فى القدرة المنقولة عبر خطوط التيار المتردد ، على سبيل المثال يمكنها أن تتحكم فى القدرة غير الفعالة المنقولة عبر هذه الخطوط ومن ثم تزيد من استقرار جهد المنظومة الكهربائية.

و حيث أن المنظومة الكهربائية التقليدية من مولدات ومحولات وخطوط وغيره لا يمكن تغيير الـ Parameters الرئيسية بها مثل الجهد والمعاوقة والـ Phase Angle إلا من خلال فتح قواطع أو غلقها أو تركيب خطوط/مولدات/محولات جديدة وكل هذه أمور مكلفة جدا وتحتاج لوقت وأراضى واستثمارات ، أما مع استخدام هذه الأجهزة الحديثة فيمكن تحقيق نفس الأهداف ولكن إلكترونيا باستخدام تقنيات ومعدات الـ Facts ومن هنا سميت بهذا الاسم ويعنى Flexible Ac Transmission Systems أو الخطوط المرنة لنقل التيار المتردد.

11.4.3 التحكم فى عناصر الشبكة

ولتنفيذ الأهداف السابقة على أرض الواقع ، هناك العديد من الأجهزة التى يمكن استخدامها . منها على سبيل المثال:

1- أجهزة تقليدية مثل :

1. Synchronous Generator
2. Synchronous Motors
3. Shunt Reactors
4. Series Capacitors
5. Shunt Capacitors

2- أجهزة حديثة تدرج ضمن مجموعة الـ FACTs مثل:

6. Static VAR Compensator, SVC
7. Static Synchronous Compensator, STATCOM
8. Static Synchronous Series Compensator, SSSC
9. Unified Power Flow Controller, UPFC

وهذه الأجهزة - سواء القديمة أو الحديثة - تساعد في التحكم في قيم ثلاثة عناصر رئيسية هي:

- 1- الجهد
- 2- الـ Phase angle
- 3- المعاوقة X

وسنرى في هذا الفصل أن الأجهزة التسعة السابقة يمكنها التغيير والتحكم في القيم الثلاثة السابقة كما أنها تتشابه جميعا في امتلاك القدرة على التحكم في قيم القدرة غير الفعالة ، ولذلك يطلق عليها مصطلح عام هو : "معوّضات القدرة غير الفعالة" أو Reactive Power Compensators .

والفرق بين الأجهزة التقليدية (من 1 إلى 5) والأجهزة الحديثة (من 6 إلى 9) هو أن التقنية الحديثة تحقق كل الأهداف بتكلفة ومفايد أقل كثيرا من الأساليب التقليدية.

فكيف يتم التحكم في القدرة غير الفعالة؟ هذا ما سنعرضه بأسلوب مبسط للأدوات التسعة السابقة .

11.5 الأجهزة التقليدية للتحكم في تدفق القدرة غير الفعالة

11.5.1 المولدات الكهربائية :

وقد يكون تيار الـ Field في المولد أقل من الطبيعي ومن ثم تسحب المولدات قدرة غير فعالة من الشبكة الكهربائية وقد تكون إثارة المولدات أى تيار الـ Field أعلى من الطبيعي ومن ثم تدفع المولدات قدرة غير فعالة تغذى بها الشبكة ، ولكن القدرة غير الفعالة التى يعطيها المولد أو يمتصها محدودة دائما بقدرة المولد وفقا لرسم الدائرة circle

diagram الخاص بالمولد (شكل 11-9 السابق) ، إضافة إلى أن إنتاج أكبر لقدرة غير فعالة يعنى إنتاج أقل للقدرة الفعالة من نفس المولد ، ولهذا فاستخدام هذا الأسلوب يعتبر محدود الاستخدام .

11.5.2 المعضات المتزامنة Over-Excited Synchronous Motor :

وهى فى الحقيقة عبارة عن محركات متزامنة Synchronous Motors ولكن غير محملة Unloaded . ولهذا النوع ميزات عديدة منها أن القدرة غير الفعالة التى تولدها لا تتأثر بجهد المنظومة لأن لها مصدر جهد خاص بها ، كما يمكنها توليد من 10-20 % أكبر من قدرتها الاسمية لمدة نصف ساعة ، ولكن يعيبها التكلفة العالية وكثرة أعطالها وبطء استجابتها للتغيرات مقارنة بالأنواع الحديثة.

لاحظ أنه محرك من النوع الـ Synchronous يشبه فى تركيبه المولدات المتزامنة تماما لكن يختلف فى شيئين :

- الأول : أنه غير محمل بأى أحمال ومن ثم لا يستهلك أى P مطلقا
- الثانى هو طريقة التحكم فى المجال المغنطيسي له الذى يمكن عن طريق التحكم فيه أن نتحكم فى كمية الـ VAR التى ينتجها ومن ثم فهو لا ينتج سوى قدرة غير فعالة وبقيمة متغيرة وأسلوب التغيير سلس وناعم على عكس الـ Shunt Cap/Ind الذى يحتاج إلى CBs أو Contactors للتحكم فى عدد المكثفات/الملفات التى تدخل أو تخرج من الخدمة.

لاحظ أن عدم إنتاجها لأي P يعنى أنها تنتج Q بمدى أو كميات أكبر بكثير من المولد التقليدى ، علاوة على أنها تصنع بتصميم خاص فتصبح أقل تكلفة من المولدات الكهربائية التقليدية التى تنتج P and Q .

11.5.3 استخدام Shunt Reactors :

تستخدم هذه الـ Reactors مع شبكات الجهد العالي ويمكنها امتصاص القدرة غير الفعالة الزائدة والتى غالبا تكون من النوع الـ Capacitive ونتاجة عن وجود أطوال كبيرة من الكابلات أو خطوط طويلة مع انخفاض فى الأحمال ومن ثم تتسبب فى ارتفاع الجهد مالم يكن هناك وسيلة مثل الـ Shunt Reactors وتوصيلها على الشبكة فى هذه الأوقات لامتناس هذه القدرة غير الفعالة لكن يعيب هذه الطريقة الحاجة لتركيب CBs مكلفة ، خاصة فى الجهود العالية ، كما أن هناك مشكلة أنه قد يحدث ارتفاع مفاجئ فى القدرة غير الفعالة نتيجة فصل مفاجئ لأحد الأحمال قبل توصيل الـ Shunt Reactors (شكل 11-12) فى الخدمة. والبديل ليس مقبولا وهو توصيلها بشكل دائم حيث سنحتاج لعمليات فصل وتوصيل متعددة حسب تغير الأحمال.



Figure 11-12 Shunt Reactors

11.5.4 استخدام السلسلة Series Capacitors :

تركب هذه المكثفات على التوالي مع الشبكة (شكل 11-13) ومن ثم تؤدي إلى تناقص الـ X المكافئة ومن ثم تزايد القدرة المنقولة عبر نفس الخط أو تزايد إمكانية النقل لمسافة أطول لنفس القدرة. وكون أن هذه المكثفات موصلة على التوالي يعني أن القدرة غير الفعالة المولدة ستتاسب طرديا وأتوماتيكيا مع زيادة التحميل وهذا يعني تنظيم أفضل للجهد.

لكن يعيب هذه الطريقة حدوث ارتفاع في الجهد مع التحميل الخفيف مما يتطلب تركيب Shunt Reactors بصفة مستمرة وهذا بالطبع سيقبل من القدرة المنقولة وبالتالي يقلل من أهمية هذا الأسلوب . كما أن هناك احتمالات كبيرة لحدوث Resonance ومرور تيارات عالية مدمرة.

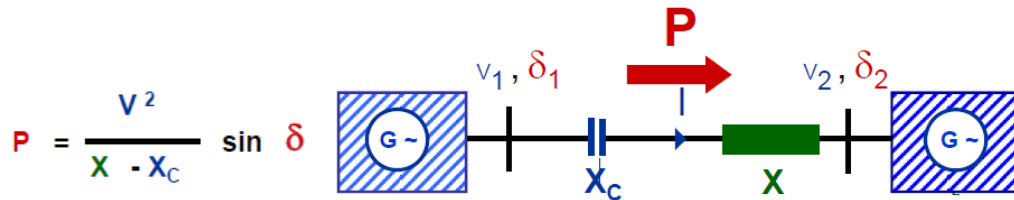


Figure 11-13 Series Compensation

11.5.5 استخدام السلسلة Shunt Capacitors :

في هذا الأسلوب تستخدم المكثفات على التوازي ، وتكون عادة موصلة بصورة دائمة ومركبة بالقرب من الأحمال الكبيرة التي لها معامل قدرة منخفض كما في الشكل 11-14 .

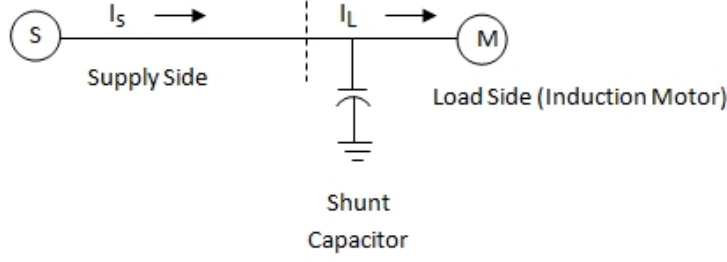


Figure 11-14

وهنا تكون القدرة غير الفعالة حساسة جدا للتغير فى الجهد (تناسب مع مربع الجهد) كما فى المعادلة التى تظهر مع الشكل 11-15 ، فعند انخفاض الجهد سيحدث انخفاض فى القدرة غير الفعالة المولدة من هذه المكثفات وهذا عكس مانريد ، فنحن نريد Q عالية عند انخفاض الجهد لتحسينه ، ومن ثم فهذا عيب خطير فى هذا الأسلوب كما أن مشكلة الخوف من حدوث الرنين مازالت قائمة كما فى الأسلوب السابق.

والمشكلة الأخرى هذا الأسلوب هى الحاجة لقواطع تتحمل الارتفاع فى الجهد نتيجة عملية الـ Switching كما فى الشكل 11-15.

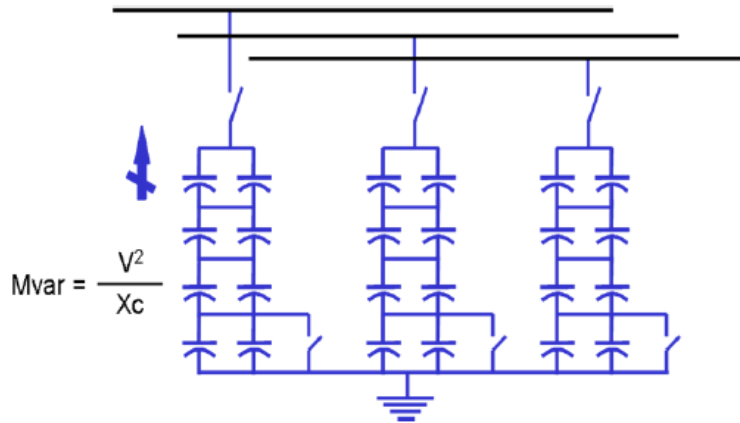


Figure 11-15

11.6 ثانیا : أجهزة الـ FACTS للتحكم فى تدفق القدرة

هذه المنظومة تستخدم مع شبكات النقل وتتميز عن الأساليب السابقة فى أنها تشتمل على مكثفات و ملفات فى وقت واحد ومن ثم فهى قادرة على إنتاج Capacitive/ Inductive Reactive Power ، وتتميز أيضا بسرعة رد الفعل والاستجابة السريعة لأي تغير فى الجهد سواء بالزيادة أو النقصان لأن التحكم فى كمية الـ Q يتم عن طريق SCR – Control Circuits وهى أسرع من الـ Switched Capacitors المستخدمة فى الأنواع التقليدية .

والأجهزة التالية هي عناصر تستخدم ضمن منظومة الـ FACTS أى المنظومة المرنة لنقل التيار المتردد. و هذه الأجهزة هي:

11.6.1 أجهزة المعوضات الثابتة Static VAR Compensators, SVC

وهو أبسط أنواع الـ Facts حيث يتكون من مكثفات مركبة على التوازي Shunt Capacitors ، أو تتكون من Inductors موصلة أيضا على التوازي لكنها الفرق هنا عن الحالات التقليدية أنهما يركبان معا فى نفس الوقت و يمكن إجراء عمليات فصل وتوصيل لأي منهما وبأى نسبة بواسطة ثايرستورات محكمة بدوائر تحكم. ومصطلح الـ SVC يتضمن تحته ثلاثة أنواع:

- 1- Thyristor-Controlled Reactors (TCR).
- 2- Thyristor-Switched Capacitors (TSC).
- 3- Thyristor-Switched Reactors (TSR).

يظهر النوعان الأول والثانى منهم فى الشكل 11-16 .

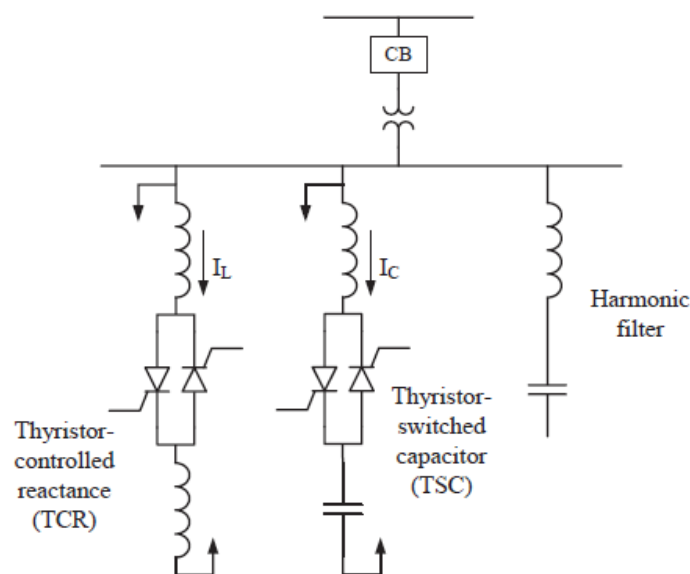


Figure 11-16 SVC

ويتم التحكم فى قيمة الـ Reactance عن طريق التحكم فى درجة توصيل الـ SCR .

لاحظ ضرورة وجود محول بين SVC وبين الشبكة لأننا لا نستطيع تركيبه مباشرة على الجهد العالي بسبب محدودية الجهود التى تعمل بها أجهزة الـ SCR حتى الآن.

والشكل 11-17 هي لمجموعة مكثفات فى إحدى محطات الجهد العالي فى السعودية.



Figure 11-17 HV Capacitors

ويمكن أن نرى أننا حققنا عدة مكاسب من استخدام الـ SVC:

- 1- القيمة متغيرة أوتوماتيكيا وبسهولة حسب تغير وضع الأحمال
- 2- لا حاجة لوجود CB مكلفة
- 3- يمكن توليد قدرة غير فعالة من خلال Thyristor Switched Capacitor, TSC ويمكن أيضا من نفس الجهاز امتصاص القدرة غير الفعالة بواسطة Thyristor Controlled Reactor, TCR
- 4- بمعنى أنها أصبحت كما لو كانت X متغيرة (لاحظ الاسم Flexible)

لكن يعيب هذا النوع :

- التكلفة العالية
- محدودية القدرة حسب احجام المكثفات والـ Inductors المتاحة بالموقع
- تأثر القدرة غير فعالة الـ Capacitive بانخفاض الجهد وبالتالي يقل المنتج منها.



Figure 11-18 : SVC ± 250 MVAR in Brazil

11.6.2 أجهزة الـ STATCOM :

وتعني Static Synchronous Compensator وهي تطوير للـ SVC السابق شرحه ، وهو عبارة عن Inverters لكنها لا تستخدم الثايرستور العادي بل تستخدم نوعاً أحدث وهو Gate Turn Off , GTO ، حيث التحكم في هذا النوع أسرع وأسهل من النوع التقليدي ، لكن الأهم من ذلك هو أننا هنا لا نستخدم مكثفات ولا Reactors وفي نفس الوقت ننتج ونستهلك قدرات غير فعالة. فكيف يتم ذلك؟

الفكرة هنا هو استخدام دوائر تحكم في الـ Inverter بحيث ينتج جهداً وتياراً (من بطاريات ومجموعة صغيرة من المكثفات) بحيث تكون الـ Phase angle بين الجهد والتيار الناتجين إما 90 درجة Lead أو 90 درجة Lag ، شكل 11-19 ، وهذا يعني أننا أنتجنا قدرة غير فعالة Capacitive or Inductive بدون أن نستخدم مكثفات ولا ملفات. وهذه هي الميزة الأهم لأجهزة الـ STATCOM حيث يترتب على هذه الميزة ميزات أخرى منها صغر الحجم والحاجة لمساحة أقل حيث لا نحتاج لملفات ولا لمكثفات (سوى ما لا يزيد عن 12% من المكثفات التي كانت تستخدم في الـ SVC وهي هنا ليست بغرض توليد قدرة غير فعالة ولكن بغرض إكمال دائرة الـ Inverter)

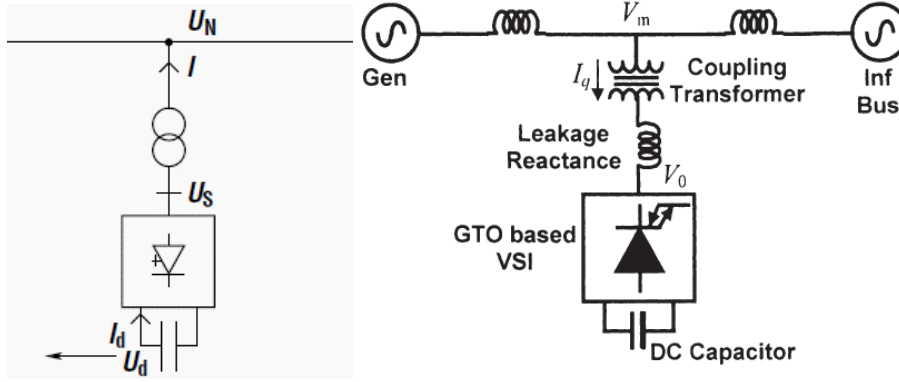


Figure 11-19 STATCOM

ويتميز أيضا بأنه لا يتأثر بجهد الشبكة عند توليد Capacitive Reactive Power ، وهذه الأجهزة موجودة بالخدمة منذ الثمانينيات.

11.6.3 أجهزة الـ Static Synchronous Series Compensators :

وتسمى المعوضات الثابتة الموصلة على التوالي SSSC ، وهو يشبه تماما الـ STATCOM ولكنه يركب على التوالي مع الشبكة وليس على التوازي (شكل 11-20) ومن ثم يعمل على تغيير الـ X المكافئة ومن ثم يمكننا زيادة/أو تقليل القدرة المنقولة عبر الخط دون الحاجة إلى إجراء تغيير في الخطوط. ويتميز عن الـ Series Capacitors أنه لا يتأثر بقيمة التيار المار في الدائرة ومن ثم فمجالات استخدامه أوسع.

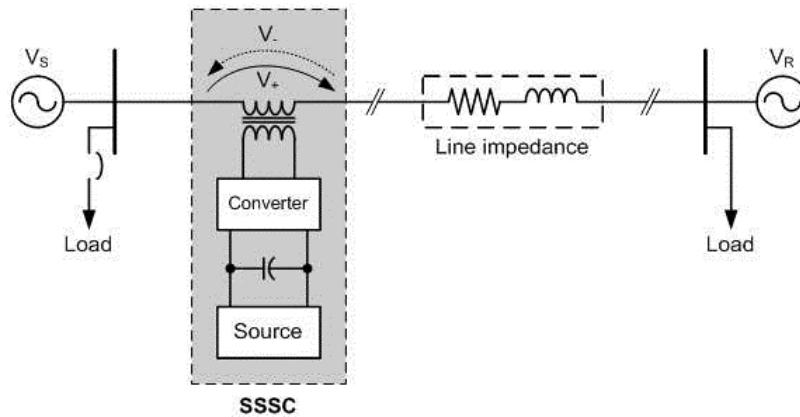


Figure 11-20 SSSC

11.6.4 منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow

Controllers

هذا الجهاز هو عبارة عن الجهازين السابقين معا أى يركب على التوالي والتوازي (شكل 11-21) ، ومن ثم يجمع ميزات كلا النوعين ومن هنا جاءت تسميته بمنظم سريان القدرة الموحد.

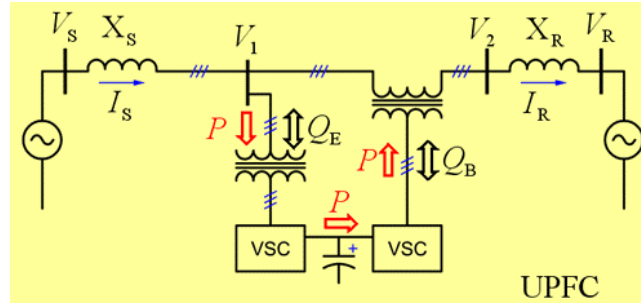


Figure 11-21 UPFC

الباب الثالث

محطات التحويل الكهربائية

(SUBSTATIONS)



12

مقدمة عامة عن محطات التحويل

12.1 مقدمة

معلوم أن الطاقة المولدة في محطات التوليد يتم نقلها إلى مراكز التوزيع من خلال منظومة لنقل وتوزيع الطاقة . وأحد أهم مكونات هذه المنظومة هي محطات التحويل الكهربائية أو الـ Substations .

ويمكن أن تعتبر محطات تحويل الطاقة الكهربائية في شبكتي النقل والتوزيع الكهربائي بمثابة المفصلات في جسم الإنسان ، فرغم وجود الأيدي والأرجل والأصابع وغيرها إلا أن كافة هذه الأعضاء تعتمد في عملها على وجود المفصلات ، فهكذا محطات التحويل تربط بين محطات توليد الطاقة الكهربائية المختلفة بعضها البعض ، كما تربط مراكز توزيع الأحمال بمحطات التوليد .

ونظرا لبعدها محطات التوليد عن الأحمال فكان لابد من إنشاء محطات تحويل لرفع الجهد Step Up S/S من أجل تقليل الفقد في الطاقة كما هو معلوم ، وهذه النوعية من المحطات (Step Up S/S) تقع داخل محطات التوليد . ثم تخرج خطوط الجهد العالي إلى عدد من محطات الجهد العالي أيضا في أماكن أخرى بالدولة بغرض ربط محطات التوليد معا بواسطة شبكات الجهد العالي . ثم هناك ربط بين المحطات ذات الجهود العالية المختلفة لتكوين الشبكة الموحدة .

فعلى سبيل المثال فإن محطات التحويل جهد 500/220 kV ، تربط بين شبكتين مختلفتين في الجهد (شبكة الـ 500 ك ف ، وشبكة الـ 220 ك ف) ، وهذا النوع من محطات التحويل تسمى Transmission Substations ، حيث تتصل هذه المحطات ببعضها البعض عن طريق خطوط نقل – أرضية أو هوائية – لنقل الطاقة سواء في الدخول عليها أو الخروج منها ، ودورها الأساسي هو ربط محطات التوليد معا لتكوين الشبكة الموحدة التي تحدثنا عنها في الفصل الأول من الكتاب.

ولتوزيع الطاقة المولدة في المناطق القريبة من الأحمال فهذا يتطلب إنشاء نوع آخر من محطات التحويل هو الـ Distribution Substations ، والهدف من هذا النوع من محطات التحويل القريبة من الأحمال هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة ، إلى عدد كبير من المغذيات متوسطة الجهد والقدرة ، لتغذى مساحة جغرافية أكبر .

ثم يكون النوع الأصغر من محطات التحويل والتي تصنف أيضا على أنها Distribution Substations وهي المحطات الموجودة في وسط مناطق الأحمال والتي تحول الجهد المتوسط إلى جهد منخفض ، ويتم التوزيع منها على المستهلكين كما في الشكل 1-12.

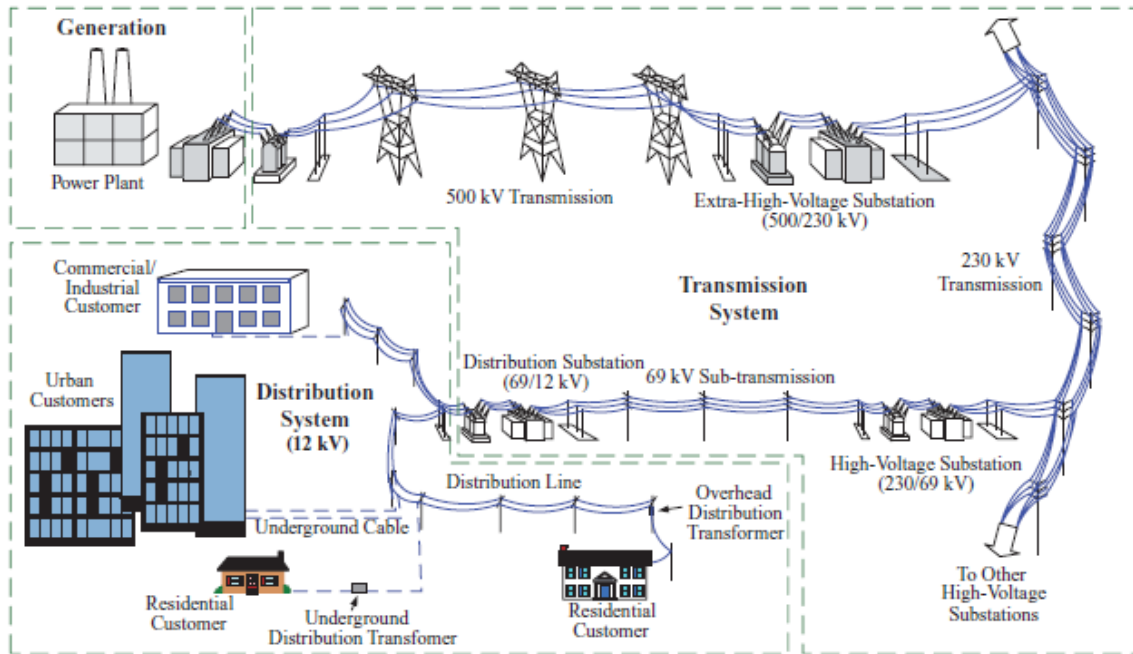


Figure 12-1 أنواع محطات التحويل

12.1.1 أهمية محطات الـ Transmission S/S

نحن نحتاج إلى ربط شبكات النقل ذات الجهود المختلفة ببعضها البعض من أجل نقل وتبادل الطاقة بين هذه الشبكات حسب الحاجة ، فعلى سبيل المثال هناك في مصر محطات توليد تتصل مباشرة بشبكة الـ 500 kV ، وهناك محطات توليد أخرى ترتبط مباشرة بشبكة الـ 220 kV ، وهذا يعني أن لدينا في كل شبكة منهما مخزون من الطاقة المولدة ليس بالضرورة أن يكون متساويا . ولذا فهذه الشبكات ترتبط ببعضها البعض وتتبادل الطاقة فيما بينها ، وتسمى المحطات حينئذ بمحطات النقل (Transmission substations) حيث ترتبط المحطات من هذا النوع بعدد من خطوط النقل .

وبعض محطات النقل يمكن أن يوجد بها Phase Shifting Transformers للتحكم في الـ Power Flow ما بين الشبكتين . فكما هو معلوم فإن الطاقة المنقولة من محطة لأخرى تحسب من المعادلة :

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

وكما هو واضح من المعادلة فإن أحد طرق التحكم في القدرة المنقولة هو التحكم في الزاوية بين جهدي المحطتين هي δ_{12} التي تعرف بالـ Power Angle ، وهذا يمكن أن يتم من خلال Phase Shifting Transformers . وبالتالي فهذا دور آخر من أدوار محطات التحويل .

12.1.1 أمثلة عملية

وكمثال لمحطات الربط بين الشبكات ذات الجهد المختلف انظر مثلاً إلى محطة محولات "القاهرة 500" في الشبكة الموحدة التي عرضت في بداية الباب الأول (شكل 1-7) ، ففي هذه المحطة يوجد محولات بجهد 500/220 kV ، حيث تستقبل هذه المحطة خطوط نقل جهد 500 ك ف من أربع محطات توليد هي : الكريمت وشمال الجيزة والنوبارية وغرب القاهرة ، وترتبط بخطوط نقل جهد 500 ك ف مع محطات تحويل ليس بها توليد لكن لمجرد الربط مع الشبكات الأخرى مثل محطات باسوس وسمالوط ، كما ترتبط بخطوط أخرى تقع ضمن شبكة الـ 220 ك ف مثل محطات الهرم والمعتمدية و6-أكتوبر (محطة توليد) ، وبالتالي تعتبر محطة للربط بين شبكتي الـ 500 kV والـ 220 kV ، وبالتالي فهي محطة محورية بين شبكتين لهما جهد مختلف وفي كل منهما محطات توليد مختلفة.

وقد يكون من أدوار محطات التحويل مجرد الربط بين محطات من نفس الجهد بغرض تحسين القدرة على عمل مناورات للتغذية أثناء فترات الأعطال أو الصيانة ، كما في كثير من محطات شبكة الـ 66 ك ف بمصر التي يظهر جزء صغير منها في (شكل 12-2) حيث تجد كثير من المحطات ترتبط بعدد آخر من المحطات المجاورة وليس بالضرورة أن ترتبط بمحطة توليد مباشرة.

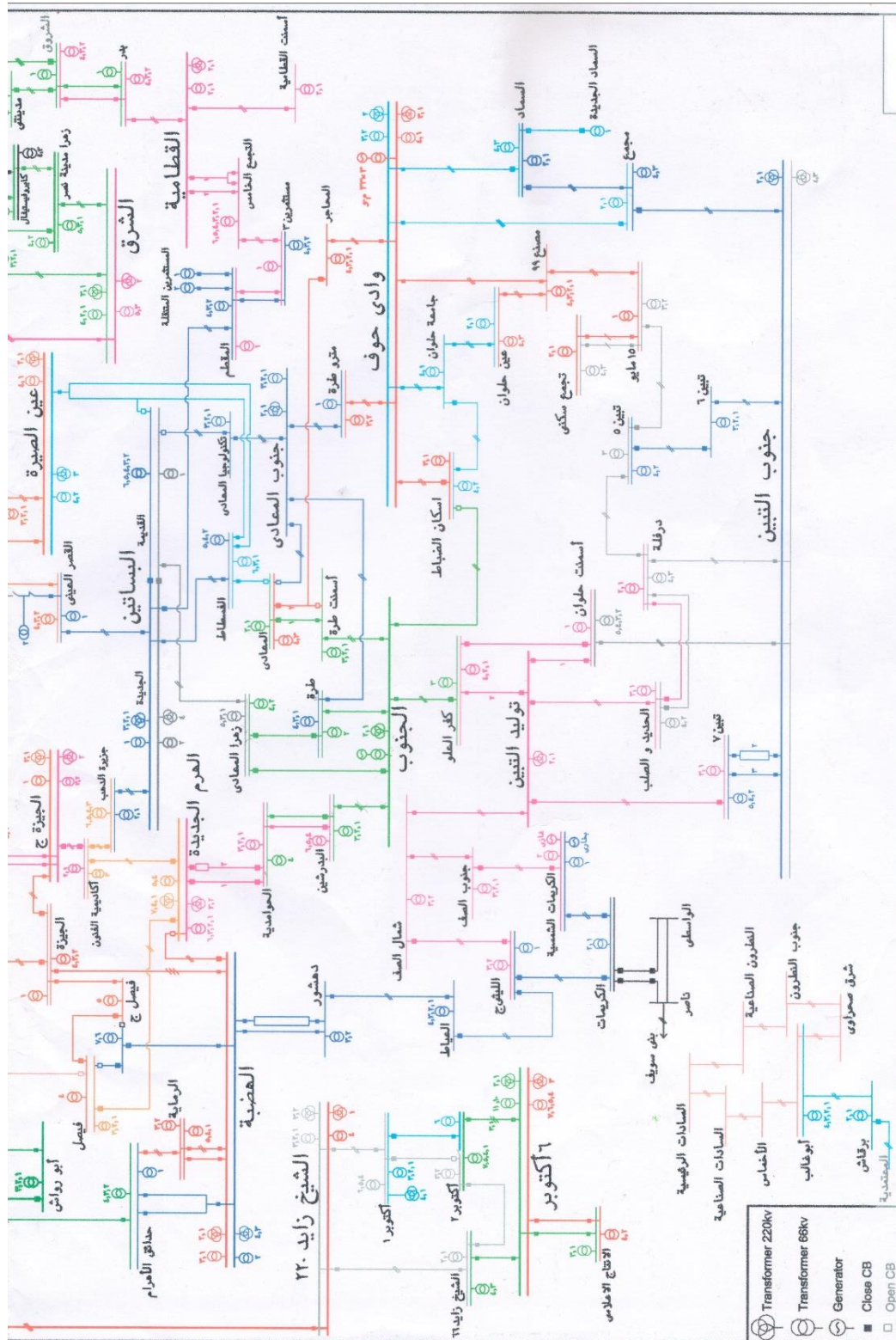


Figure 12-2

جزء صغير من شبكة الـ 66 ك ف في مصر

أو كما في الشكل 12-3 ، الذي يمثل جزءا من شبكة الـ 132 ك ف في الكويت ، محطة الـ ARDY C مثلا تربط بين محطات الـ ARDY E ومحطة الـ ARDY AW ومحطة الـ SBNR C ، وجميعهم لهم نفس الجهد 132 kV ، وليس فيهم أى محطة توليد ، ولكن الفائدة هنا أننا يمكن تغذية المحطة من عدة جهات حسب ظروف التشغيل.

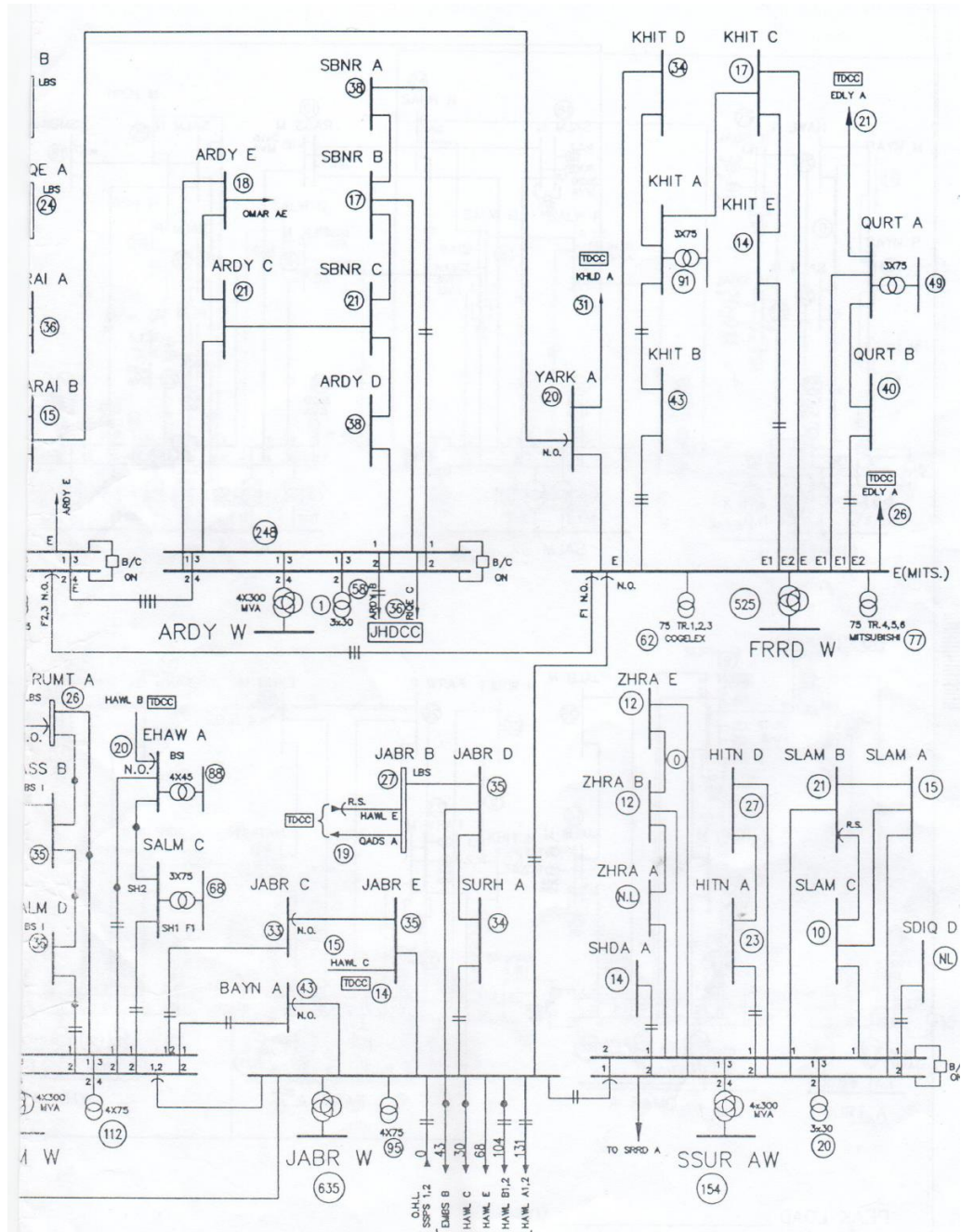
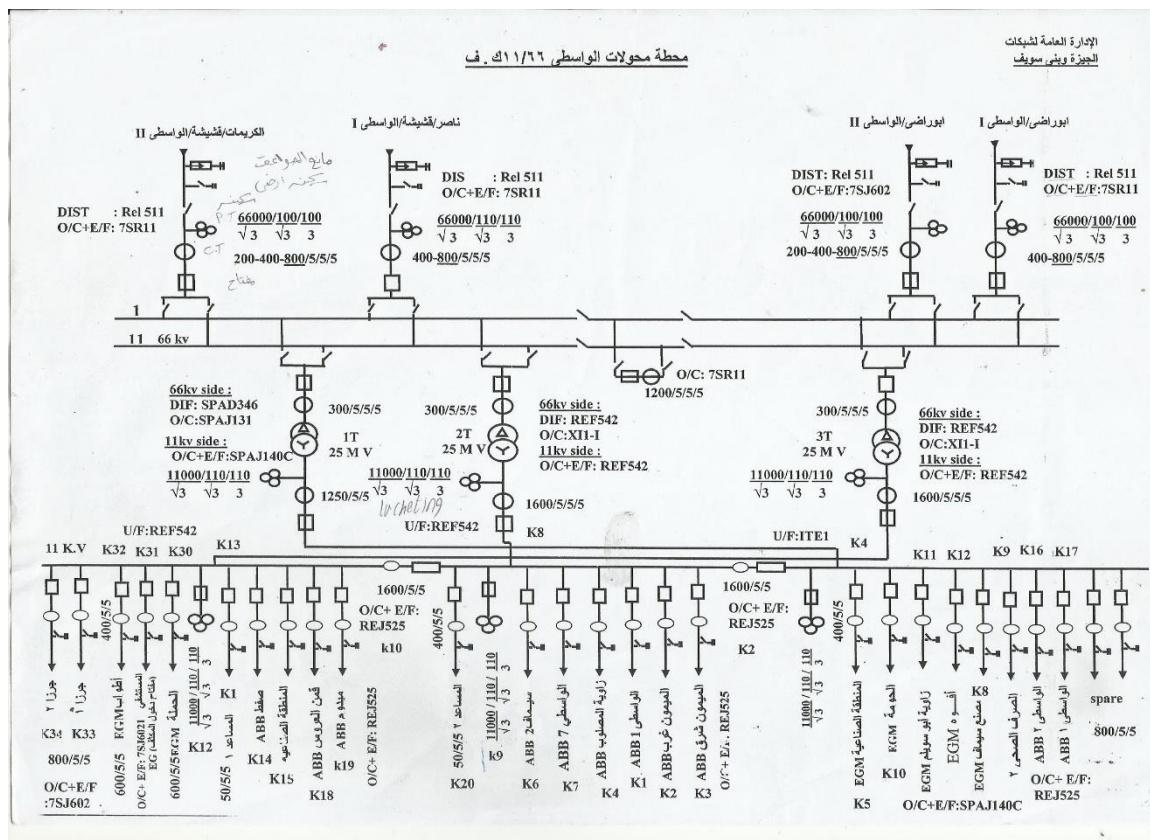


Figure 12-3

جزء من شبكة الـ 132 ك ف في الكويت

وقد يكون دور محطة التحويل هو الربط مع محطات من نفس الجهد كما في الأمثلة السابقة لكن في نفس الوقت ترتبط مع شبكة التوزيع على سبيل المثال محطة محولات الوسطى بصعيد مصر (شكل 12-4) ، فهي ترتبط مع محطات الواسطى ومحطة مركز ناصر والكريمات وكلهم على شبكة الـ 66kV من خلال خطوط ربط ، بالإضافة إلى ارتباطها بشبكة الـ 11kV من خلال ثلاثة محولات جهد 66/11kV ، وهذه المحولات الأخيرة يخرج منها ما يقرب من 30 كابل (من K1 إلى K31) إلى الموزعات Distributors المنتشرة بالمدينة كما يظهر في المخطط العام للمحطة.



محطة تحويل من شبكة النقل للتوزيع Figure 12-4

12.1.2 وظائف أخرى لمحطات التحويل

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى تحديد أهداف ووظائف محطات التحويل في الشبكة الكهربائية ، ونلخصها هنا فيما يلي :

1- ربط وحدات التوليد معا ضمن الشبكة الموحدة .

2- رفع مستوى جهد التوليد إلى مستوى جهد النقل (بهدف تقليل المفقودات Losses بشبكة النقل) وبالتالي ربط شبكات النقل ببعضها.

3- ربط شبكة النقل بشبكة التوزيع ، حيث يتم خفض مستوى الجهد من مستوى جهد النقل إلى مستوى جهد التوزيع الذى يناسب خدمة المستهلكين الكبار (المصانع مثلاً) ، وكذلك خفض مستوى الجهد ضمن الحدود والمتطلبات المناسبة للمستهلك العادى . وهناك كثير من محطات التحويل تحقق الوظيفتين الثانية والثالثة معا .

4- التحكم فى فصل وتشغيل دوائر الخطوط ودوائر المحولات عند الحاجة لإجراء الصيانة والفحوصات المبرمجة أو عند الحاجة للتوسعة والتركيبات الإضافية عن طريق المفاتيح الكهربائية المتواجدة في محطات التحويل والتي يمكن التحكم فيها من داخل المحطات أو من مراكز التحكم المركزية .

وكل هذه الأهداف أو الوظائف يمكن استنتاجها من المقدمة السابقة ، لكن هناك هدفين آخرين سنذكرهما لاحقاً حين نتحدث بالتفصيل عن مكونات محطات التحويل . فمن خلال دراسة هذه المكونات سيتبين أنه يوجد داخل محطات التحويل المعدات الخاصة بمهمتين كبيرتين إضافيتين ، هما تنظيم الجهد ، ووقاية المعدات الكهربائية .

1- فأما تنظيم الجهد فيتم عن طريق استخدام Transformer Tap Changer ، أو أجهزة الـ Voltage Regulators ، أو عن طريق توصيل Capacitors or Inductors ، أو باستخدام أجهزة الـ FACTS للتحكم فى قيم القدرة غير الفعالة من أجل رفع أو خفض قيمة الجهد بالشبكة ، ومعظم هذه المعدات موجودة داخل محطات التحويل . وهناك المزيد من التفاصيل حول هذا الموضوع فى الباب الثانى ، الفصل الحادى عشر : Facts ، وأيضاً فى الباب السادس الفصل التاسع والعشرون : استقرار الجهد ، من هذا الكتاب .

2- وأما أنظمة الوقاية الموجودة بداخل هذه المحطات فيمكن من خلالها اكتشاف الأعطال سواء كانت هذه الأعطال بالمعدات الموجودة داخل المحطة أو على الخطوط الخارجة منها أو الداخلة إليها ، وبالتالي فمهمة فصل أى جزء من شبكة النقل أو شبكة التوزيع نتيجة الأعطال أو نتيجة إجراءات الصيانة تقع على عاتق مهمات الوقاية الموجودة داخل محطات التحويل . وسنشير باختصار لأسماء منظومات الوقاية المركبة على العناصر المختلفة بالمحطة دون تفاصيل فى نهاية هذا الباب . ويمكن الرجوع لكتابتى :
نظم الحماية الكهربائية فى شرح التفاصيل الخاصة بمنظومة الوقاية.

12.1.3 تصنيف محطات التحويل

محطات التحويل يمكن تصنيفها طبقاً لعدة معايير . وأهم هذه المعايير هي:

التصنيف حسب العازل المحيط بالأجزاء المكهربة (هواء ، أو غاز SF6):

1- محطات هوائية أى معزولة بالهواء الجوى Air Insulated Substation, AIS كما فى

الصور التالية:



2- محطات غازية أى معزولة بالغاز Gas Insulated Substation, GIS كما فى الصور

التالية:



و تتشابه محطات التحويل الهوائية والغازية في مكوناتهما إلى حد كبير ، والخلاف بينهما يكمن أساساً في نوع العازل (هواء / SF6) المستخدم في عزل مهمات (معدات) منطقة الجهد العالي ، أما باقي مناطق المحطة فمتشابهة تماماً في النوعين. مع ملاحظة أن هناك تطابق في أسماء المكونات الموجودة في منطقة الجهد العالي في كلا النوعين من المحطات إلا أن شكل هذه المكونات ومواصفاتها يختلف تماماً.

التصنيف حسب الجهد:

- محطات تحويل رئيسية 66/220/500 ك.ف والمتواجدة ضمن منظومة النقل.
- محطات تحويل فرعية 0.4/22 ك.ف ، أو 0.4/11 ك.ف التابعة لمنظومة التوزيع .

التصنيف حسب مكان وجود المعدات :

- خارجية (outdoor type)
- داخلية (indoor type)

في النوع الأول تكون جميع المعدات المحطة في الساحة الخارجية للمحطة ما عدا معدات التحكم والحماية (control & protection Equipment) فإنها تتركب في مبنى التحكم للمحطة (Control Building).

التصنيف حسب طريقة تركيب القضبان العمومية:

يتوفر عالمياً أنواع كثيرة من محطات التحويل حسب تركيب القضبان العمومية (Bus bar) منها:

1. (Single Bus-Bar)
2. (Single Bus-Bar with Sectionalizer)
3. (Double Bus-Bar with Single Circuit Breaker)
4. (Double Bus-Bar with Double Circuit Breaker)
5. (Breaker and half with Two Main Buses)
6. (Main and Transfer Bus-Bar)
7. (Mesh or Ring Scheme)

وسيدرس هذا الموضوع تفصيلاً في الفصل الرابع عشر من هذا الباب.

12.2 الهيكل العام لمحطة التحويل

تتكون محطة التحويل المرتبطة بشبكة النقل (سواء هوائية أو غازية) من مناطق ومنظومات رئيسية هي :

1- منطقة معدات الجهد العالي H. V. Switchgear

2- منطقة المحولات Power Transformer

3- منطقة معدات الجهد المتوسط M. V. Switchgear

4- منظومة الـ DC (غرف البطاريات و الشواحن و لوحات توزيع التيار المستمر DC)

5- منظومة التحكم Control system

6- منظومة الاتصالات.

7- منظومة إطفاء الحريق.

8- منظومة التأريض

وفيما يلي عرض مختصر وسريع لهذه المناطق و المنظومات قبل التوسع في الشرح فيما بعد.

12.2.1 المنطقة الأولى : منطقة معدات الجهد العالي

إذا كانت المحطة من النوع AIS (الهوائية) فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة التفرعات ، وهي المنطقة الأكبر مساحة ، وتشتمل أساسا على قضبان توزيع الجهد العالي الـ HV-BB الذى تدخل عليها خطوط الجهد العالي القادمة إلى المحطة ، و خطوط الجهد العالي الخارجة منها ، وبالطبع تتضمن هذه المنطقة العديد من المهمات (Elements) المرتبطة بهذه الخطوط والتي تسمى إجمالاً معدات HV Switchgear وتشمل العناصر مثل:

Lightning Arrestor, HVCB, VT, CT, Isolators, Earthing Switches, etc.

كما تتضمن هذه المنطقة أيضا الموصلات الخارجة من الـ HV-BB متجهة إلى منطقة المحولات.

أما إذا كانت المحطة من النوع الـ GIS فإن المنطقة الأولى يطلق عليها منطقة الـ High Voltage Switchgear وهي المنطقة الأكبر مساحة في هذا النوع من المحطات ، وتشتمل على نفس العناصر الموجودة في محطات الـ AIS ، والفرق فقط أن هذه العناصر تكون مدمجة معا في وحدة واحدة تسمى الـ Bay كما سنرى. (مصطلح Bay يطلق عموماً على مجموعة المعدات التي تتشارك معا لتوصيل خط أو محول على نظام الـ BB بالمحطة).

وتفاصيل هذه المنطقة تدرس في (الفصل الثالث عشر).

12.2.2 المنطقة الثانية: منطقة المحولات

وتشتمل أساسا على محولات القوى الرئيسية فيدخل عليها كابلات الجهد العالي القادمة من منطقة التفرعات ، ويخرج منها كابلات الجهد المتوسط إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط . ورغم أن المحولات عنصر أساسي في محطات التحويل إلا أننا لن نتعرض لها في هذا الكتاب ، ويمكن الرجوع لكتابي : المرجع في محولات القوى الكهربائية لدراساتها بالتفصيل.

12.2.3 المنطقة الثالثة: منطقة خلايا الجهد المتوسط

تستقبل خلايا دخول الجهد المتوسط Incoming Cells كابلات الجهد المتوسط القادمة من منطقة المحولات ، فيتم توصيلها على الـ MV-BB الذي يربط بين جميع خلايا الدخول والخروج الموجودة بالعنبر .

وهذا الـ MV-BB قد يكون من النوع Single/Double BB ، وبالتالي فإن مهمة هذه المنطقة هي توزيع الطاقة على خلايا الخروج Outgoing cells المتصلة بالـ MV-BB والتي تخرج من المحطة إلى كبار المستهلكين (مصانع / موزعات).

وتفاصيل المنطقة الثالثة تدرس تفصيلا في الباب الرابع (الفصل التاسع عشر) من هذا الكتاب.

12.2.4 القسم الرابع: منظومة الـ DC

ويضم غرفة البطاريات و الشواحن. والمعدات الأساسية التي تحتاج إلى جهد مستمر DC Voltage بالمحطات هي :

1. منظومة الحماية (القواطع والريليات)

2. منظومة الاتصالات

وتحتوي غرفة البطاريات على أكثر من مجموعة من البطاريات. على سبيل المثال:

a. مجموعة بطاريات دوائر التشغيل و التحكم Control circuits ، و هي التي تمتد أجهزة

القطع و التوصيل بالتيار المستمر جهد 220 أو 110 فولت اللازم لتشغيل القواطع ، كذلك تمتد أجهزة الوقاية بالجهد اللازم.

b. مجموعة بطاريات أجهزة الاتصالات ذات الجهد 110 أو 48 فولت.

12.2.5 القسم الخامس: منظومة التحكم

غرفة التحكم الرئيسية هي التي من خلالها يمكن فصل وتشغيل ومتابعة ومراقبة أى دائرة من دوائر الجهد العالي أو دوائر الجهد المتوسط كما سنرى لاحقاً في هذا الباب (فصل 16) . ويمكن أيضاً أن تقرأ المزيد في الفصل الأخير من الباب الرابع (الفصل 22) عند الحديث عن التحكم في منظومة التوزيع.

12.2.6 القسم السادس : منظومة الاتصالات

و يحتوى هذا القسم على جميع أجهزة الاتصالات التي تربط المحطة بمراكز المراقبة و التحكم Load Dispatch Center ، بالإضافة إلى أجهزة الفصل المعروفة بـ Inter Trip ، حيث تربط أجهزة الحماية في المحطة بأجهزة الحماية في المحطات المقابلة لها على نفس الخط والذي يطلق عليها أيضاً Tele Protection.

12.2.7 القسم السابع : القسم الخاص بمنظومة إطفاء الحريق .

و هي تحتوى على جميع المهمات الخاصة بإطفاء الحرائق Fire Fighting, FF مثل تنكات المياه و الضواغط Compressor اللازمة لضخ الماء و ضواغط الهواء الخ.

والأنظمة (الأقسام) الأربعة الأخيرة ستدرس معا في الفصل الرابع من هذا الباب (الفصل السادس عشر) تحت عنوان الأنظمة المساعدة بالمحطة.

12.2.8 القسم الثامن : منظومة التأريض

وهذه المنظومة مرتبطة بكافة الأقسام والمنظومات السابقة ، ولذا تدرس تفصيلاً في فصل خاص من هذا الباب وهو الفصل الخامس عشر.

وفي الشكل 5-12 يمثل مخطط عام لأقسام محطة التحويل 220/66/11 kV

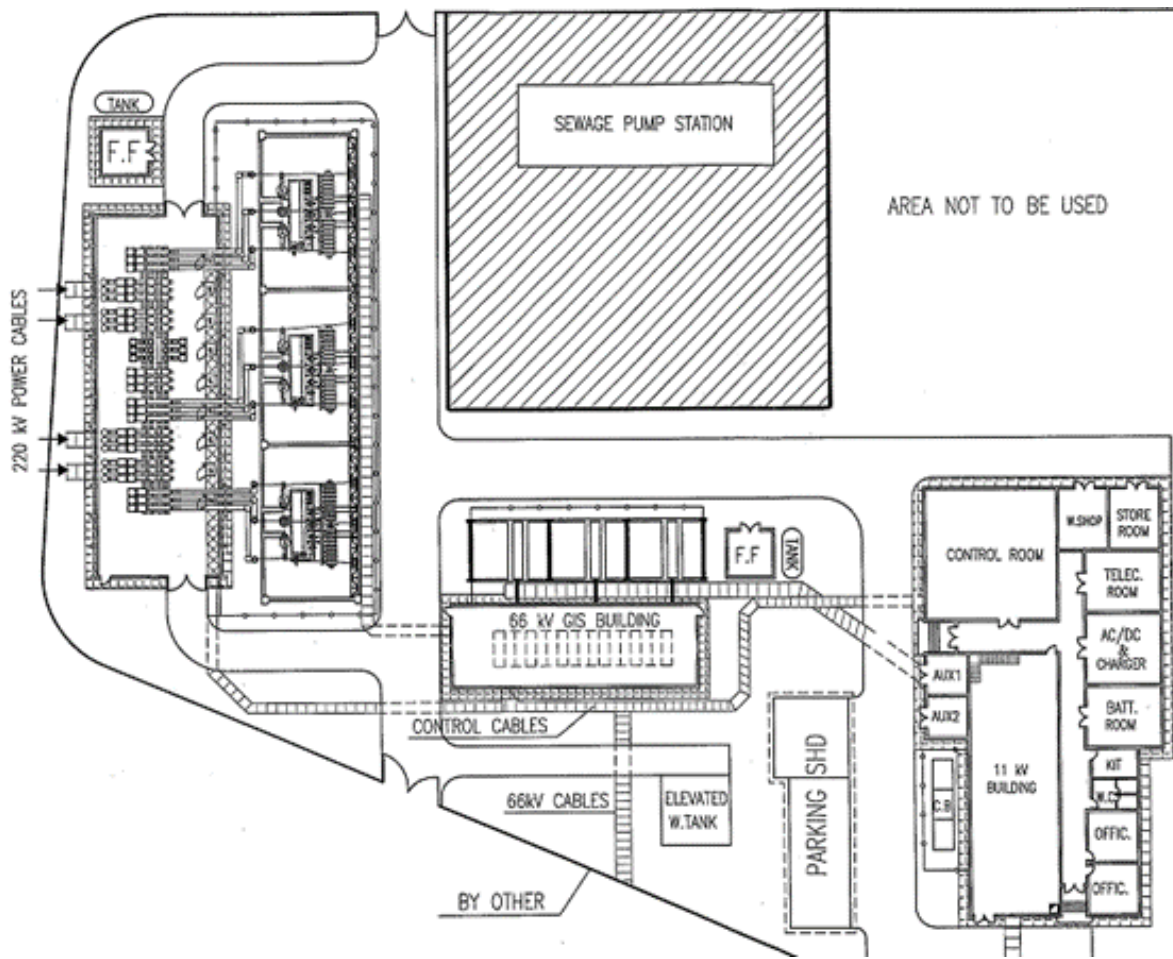


Figure 12-5 Substation Plan

12.3 الأعمال الكهربائية لإنشاء محطة تحويل

فى نهاية هذه المقدمة أود أن أذكر بشئ من التفصيل عناوين الدراسات و الأعمال الكهربائية اللازمة لإنشاء محطة تحويل. حيث تتضمن عملية تصميم محطة تحويل الأعمال /الحسابات /الدراسات الكهربائية التالية:

- ❖ اختيار محولات القدرة لرفع أو خفض الجهد (step up or step down transformers)
- ❖ اختيار ترتيب قضبان التوزيع Bus Bar arrangement
- ❖ اختيار أجهزة الفصل وسكاكين الأرضي (Isolators and grounding switch)
- ❖ اختيار محولات القياس (CT & VT) Instrument transformers
- ❖ اختيار محولات الحماية (CT & VT) Protection transformers
- ❖ اختيار أجهزة القطع Circuit Breaker
- ❖ اختيار كابح الصواعق Lightning arrestors

- ❖ اختيار نظم الحماية Protective relaying schemes
- ❖ اختيار أجهزة تعديل الجهد Voltage regulating equipment
- ❖ اختيار منظومة الكابلات
- ❖ اختيار منظومة التحكم Control System
- ❖ اختيار نظم التأريض Earthing System
- ❖ اختيار نظم الإضاءة Illumination System
- ❖ اختيار نظم الحماية من الحريق ونظم الإنذار Fire Fighting and Fire Alarm systems
- ❖ اختيار وسائل الاتصالات Communication Systems
- ❖ اختيار وسائل التغذية الإضافية Auxiliary supply
- ❖ اختيار (الغلق التبادلي) Interlocks
- ❖ اختيار منظومة الـ DC Supply (البطاريات والشواحن)

ولكى يقوم المصمم بتحديد هذه الاختيارات ، فإن عليه أن يأخذ فى الاعتبار مجموعة من الاعتبارات.

منها اعتبارات تخص المنظومة الكهربائية التى ستدخل عليها هذه المحطة ، مثل تحديد:

1- Primary System Characteristics

- ◦ Local Utility
- ◦ Nominal Voltage
- ◦ Maximum Operating Voltage
- ◦ System Frequency
- ◦ System Grounding
- ◦ System Impedance Data

وهناك اعتبارات تخص توصيف عزل المعدات منها :

2- Insulation Requirements

- ◦ (Basic Insulation Level), BIL
- ◦ Insulator and Bushing Creep
- ◦ Minimum Clearances
- ◦ Phase Spacing

علما بأن اختيار مستوى العزل سيحدد كثيرا مساحة المحطة ، وبناء عليه سيتم تحديد الخلوصلات بين الأوجه المختلفة وبين كل وجه والأرض.

وعادة يتم اختيار قيم العزل لمهمات المحطة طبقا للمواصفات القياسية والتي تأخذ في الاعتبار الجهود العالية الخاطفة Impulse voltage التي ستتعرض لها المعدات ، والتي عادة تكون إما بسبب فصل وتشغيل الأحمال/المكثفات/المحركات /القواطع ، أو بسبب عطل على أحد الأوجه في الشبكات المعزولة ، أو عند توصيل خط من جهة واحدة (جهة المصدر) بينما جهة الحمل مفتوحة ، ففي كل الحالات السابقة سيحدث نوع من الارتفاع في الجهد على المعدات ، وقد يحدث الارتفاع أيضا بسبب الصواعق الرعدية. (راجع تفاصيل هذه الجزئية في الفصل الأول من الباب السادس (فصل 28) عند الحديث عن الهزات العابرة والـ Surge Voltages في منظومة القوى.

وهناك دراسات هامة مطلوبة للتصميم مثل :

- Short-Circuit Studies
- Protective Device Coordination
- Arc-Flash Risk Assessment
- Motor Starting
- Transient Stability
- Insulation Coordination
- Harmonic Analysis

وهناك اعتبارات تخص التحكم والمراقبة

- Manned or Unmanned
- Fault Recording
- Local & Remote Control
- Automation
- Communication Protocol

12.4 خريطة الباب

في الفصول التالية ، نبدأ في عرض تفاصيل المحطات :

- ففي الفصل التالي (فصل 13) نقدم شرحا لأهم العناصر (المهمات) الموجودة في القسم الأول من محطات التحويل (الهوائية والغازية) ، ويختتم الفصل بمقارنة بين المحطات الهوائية والمحطات الغازية .

كما يعرض بسرعة للقسم الثاني (المحولات بدون تفاصيل) ، والقسم الثالث (عنبر الجهد المتوسط والذي يدرس تفصيلا في الباب الرابع).

- في الفصل الرابع عشر نقدم شرحا لأنظمة قضبان التوزيع المختلفة بالمحطات ، وميزات وعيوب كل نوع.
- في الفصل الخامس عشر نقدم شرحا تفصيليا لتصميم منظومة الأرضى .
- في الفصل السادس عشر نقدم شرحا لبقية أقسام المحطة بدءا من القسم الرابع (منظومة الـ DC) ، والقسم الخامس (التحكم والمراقبة) ، و القسم السادس (الاتصالات) ، والقسم السابع (إطفاء الحريق).

13

مهام منطقة الجهد العالي في محطات التحويل

في هذا الفصل سنتتبع جميع المهام Elements/Equipment الموجودة بالمنطقة الجهد العالي (سواء كانت هوائية أم غازية) ، وذلك من خلال تتبع ظهورها في الـ Single Line Diagram, SLD الخاص بالمحطة . وبالطبع قد تختلف أشكال الـ SLD قليلا من محطة لأخرى كما سنرى لاحقا ، بمعنى أنه ليس بالضرورة أن الشكل التالي سيتكرر في جميع المحطات ، بل ستكون هناك بعض الإضافات والحذف ، لكن تظل الخطوط العامة مشتركة في جميع أشكال الـ SLDs . وسنبداً بشرح المخطط أولاً قبل شرح المهام.

13.1 قراءة مخطط المحطة

في الشكل 13-1 نموذج لمحطة تحويل جهد 11/66 تشتمل على أربع دوائر دخول/خروج في منطقة الـ 66 ك ف ثم ثلاثة محولات جهد 11 /66 تغذي منطقة الجهد المتوسط التي تخرج منها أكثر من 30 كابل جهد متوسط إلى الموزعات والمحولات الموجودة في المنطقة الجغرافية المحيطة بالمحطة.

ونشير هنا إلى أنك لا تستطيع من الـ SLD أن تحدد هل هذه المحطة هوائية أم غازية ، لأنه كما ذكرنا سابقا جميع المكونات متشابهة في الاسم والوظيفة والدور المنوط بها في كلا النوعين من المحطات ، وإنما يكون الاختلاف الوحيد في الشكل وأسلوب العزل ، وهل هو هواء أم غاز ، وهذا لا يظهر من الـ SLD.

ويتم ربط المحطة بالشبكة الموحدة من خلال Incoming/Outgoing Feeders ، علما بأن الخطوط إذا كانت قادمة من محطة توليد فإنها تعتبر خطوط دخول فقط ، أما الخطوط القادمة من محطة محولات فهي قد تكون في فترة ما تنقل قدرة إلى المحطة فتعتبر خطوط دخول Incoming ، و قد تكون في فترة أخرى تنقل قدرة إلى خارج المحطة فتعتبر حينئذ خطوط خروج Outgoing ، و بالطبع لا يمكن أن تكون دخول و خروج في نفس اللحظة .

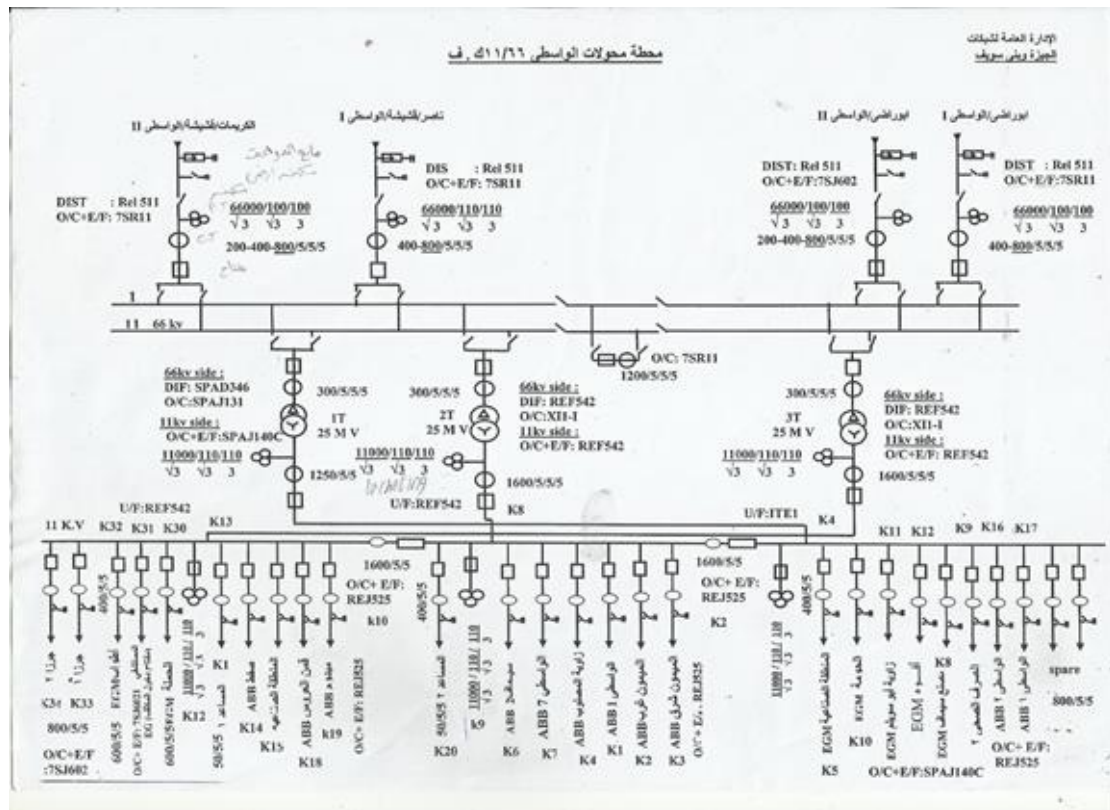


Figure 13-1

على سبيل المثال في الشكل السابق الذى يمثل محطة محولات الواسطى بنى سويف لدينا أربع دوائر جهد 66kV، الأولى قادمة من محطة الكريمت وهى محطة توليد ، وبالتالي فهذه الدائرة تعتبر التغذية الرئيسة لهذه المحطة وهى دائما دائرة دخول ، بينما الدائرة الثانية متصلة بمحطة مركز ناصر (وهى محطة محولات) ، والدائرة الثالثة والرابعة متصلين أيضا بمحطة محولات أبو راضى بمدينة الواسطى (وهى محطة محولات) ، وبالتالي فلدينا فقط دائرة وحيدة تعتبر دائرة دخول دائما ، أما الثلاث دوائر الآخر فقد تكون دخول أو خروج حسب ظروف تشغيل الشبكة.

والشكل 13-2 نموذج آخر أكثر وضوحا وتفصيلا للـ SLD.

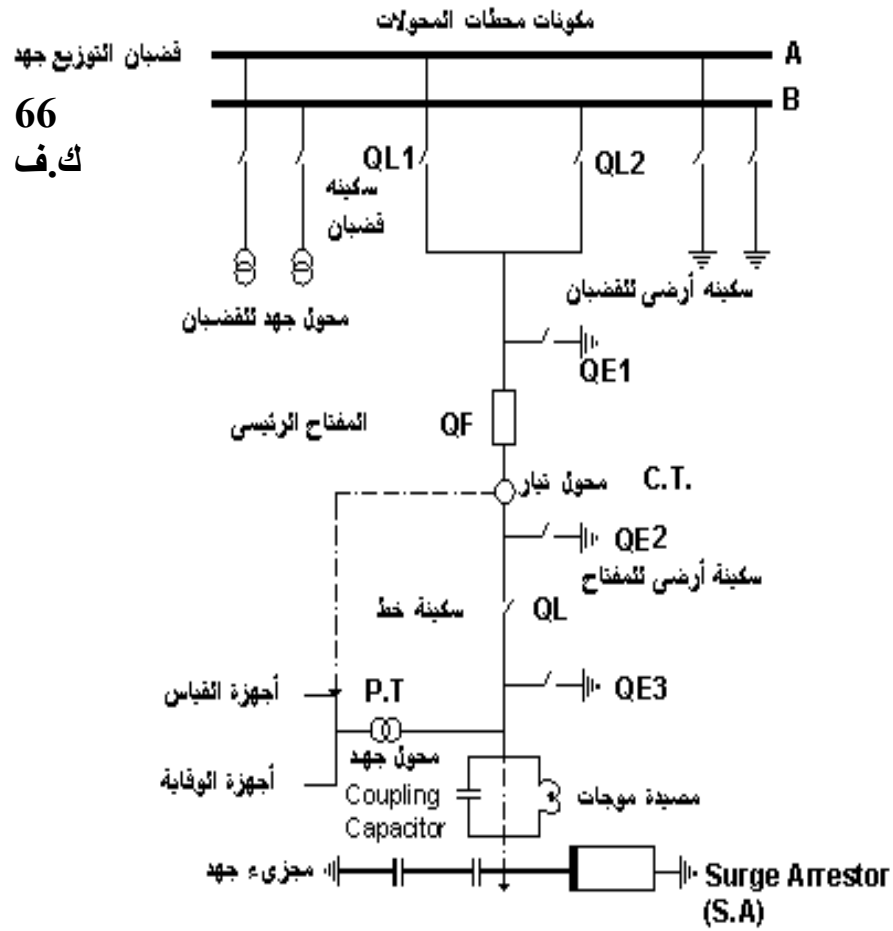


Figure 13-2 عناصر المحطة الخاصة بدخول خط على قضيبان توزيع المحطة

وترتيب هذه المهام على الـ SLD من أعلى لأسفل كالتالي:

- | | |
|-------------------------------|--|
| Bus bar, A and B | 1- قضيبان التوزيع جهد 66 ك.ف |
| Potential Transformers | أ. محول جهد لكل واحد من قضيبان توزيع |
| Earth Switches | ب. سكينة أرضي لكل واحد من قضيبان توزيع |
| Bus bar Isolators QL1 and QL2 | 2- سكينة فصل لكل واحد من القضيبان |
| Earth Switches QE1 | 3- سكينة الأرضي رقم واحد للقواطع |
| Circuit Breaker (QF) | 4- القاطع |

Current Transformer (C.T)	5- محول التيار
Earth Switches QE2	6- سكينه الأرضي رقم اثنين للقاطع
Potential Transformer (P.T)	7- محول الجهد
Earth Switches QE3	8- سكينه الأرضي للخط
Wave Trap	9- مصيدة الموجات
Surge Arrestor	10- مانعة الصواعق

والشكل 3-13 يظهر الشكل الحقيقي لهذه المهمات Equipment الموجودة داخل محطة هوائية على دوائر الدخول /الخروج فى منطقة الجهد العالي.

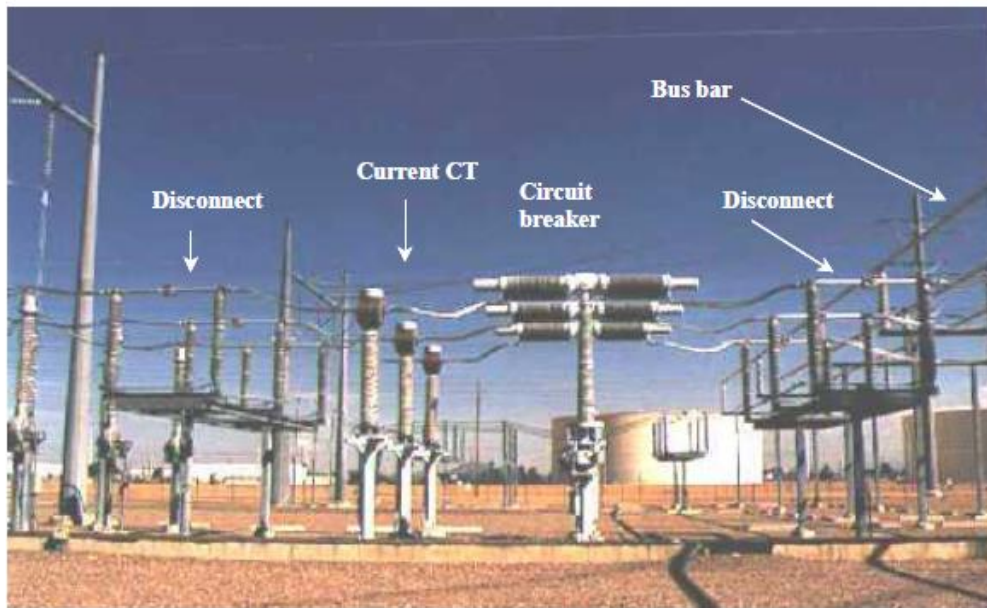


Figure 13-3 AIS

وفي الجزء الأول من هذا الفصل نعرض التفاصيل الفنية لكل عنصر من عناصر منطقة الجهد العالي فى المحطات الهوائية. ثم فى الجزء الثانى سنعرض نفس المكونات لكن فى محطات الـ GIS .

الجزء الأول من الفصل الثالث عشر

مهمات منطقة الجهد العالي في محطات الـ AIS

فيما يلي سنعرض أهم المهمات (المعدات) الموجودة في هذه المنطقة:

13.2 مانعة الصواعق SURGE ARRESTOR



Figure 13-4 LA

هي أول عنصر يركب على خط الدخول الهوائي Overhead Transmission line بعد عبوره سور المحطة . والشكل 13-4 تظهر شكلها في الواقع العملي.

وبالتالي يظهر كأول عنصر على مخطط الـ SLD . أما إذا كان الدخول للمحطة بكابلات أرضية بدلا من الخطوط الهوائية فلن تكون هناك حاجة له ، إذ هو يستخدم لحماية المحطة من الصواعق البرقية التي يمكن أن تدخل إليها بعد اصطدامها بالخط الهوائي مسببة زيادة هائلة في الجهد وقد تدمر هذه الصاعقة المحطة إذا لم يتم منع دخولها بواسطة هذا الـ Surge Arrester (Lightning Arrester, LA) .

وتتميز مانعة الصواعق بارتفاع مقاومتها جدا في الظروف الطبيعية والجهود العادية ، وبالتالي يكون التيار خلالها تقريبا يساوي صفرا ، أما في حالة الجهود العالية الخاطفة Impulse Voltages (مثل لحظات الصاعقة) فتصبح مقاومتها صغيرة جدا ومن ثم تسمح بمرور تيار عالي فتتسرب الصاعقة خلالها قبل الدخول للمحطة.

والشكل 13-5 يظهر علاقة الجهد والتيار خلالها. لاحظ أن التيار يساوي صفرا مع القيم المنخفضة للجهد (normal operating region) ثم فجأة يرتفع لقيمة عالية مع ارتفاع الجهد عن حد معين (lightning surge region) ،

النقطة الهامة التي يجب أن تذكر هنا أن التيار يعود مرة أخرى للصفر بمجرد انخفاض الجهد ، أي أن المنحنى في الشكل 13-5 يمكن أن تبدأ من أي جهة شئت.

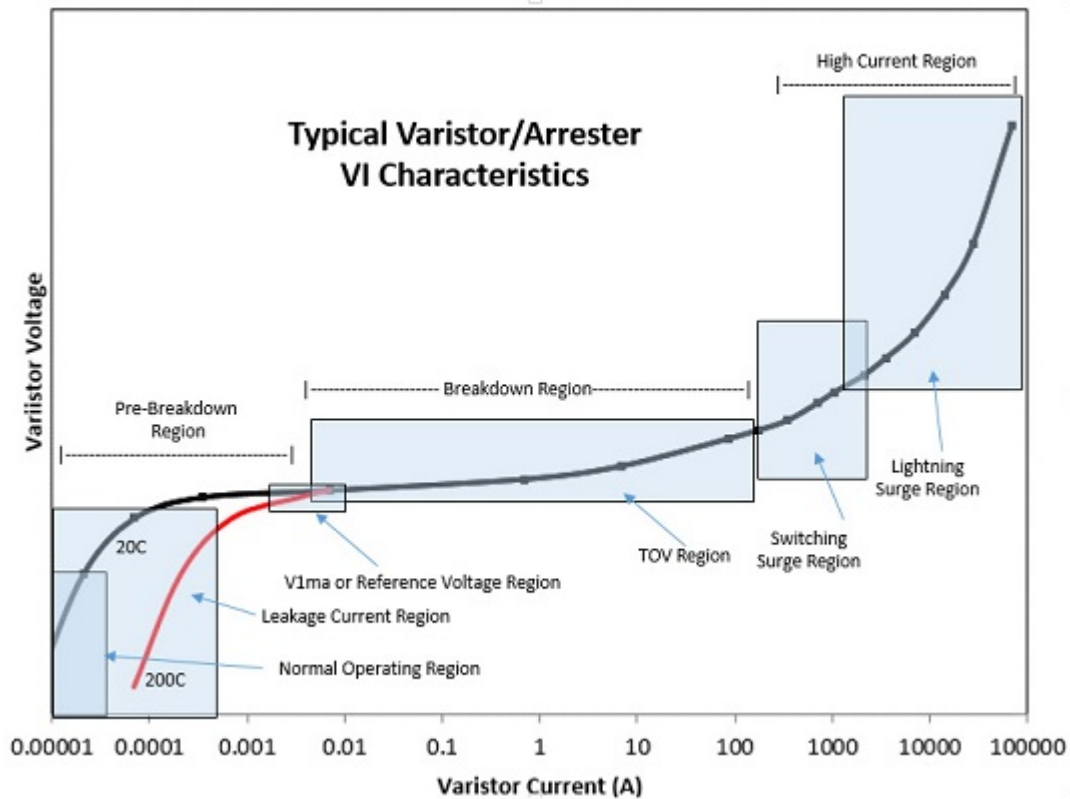


Figure 13-5 Characteristic of LA

وهناك نوعان من مانعة الصواعق:

- Conventional Gapped Arrestor (Valve Type Arrestor) -1
- Metal-Oxide (ZnO) Arrestor -2

13.2.1 النوع الأول : (Valve Type Arrestor)

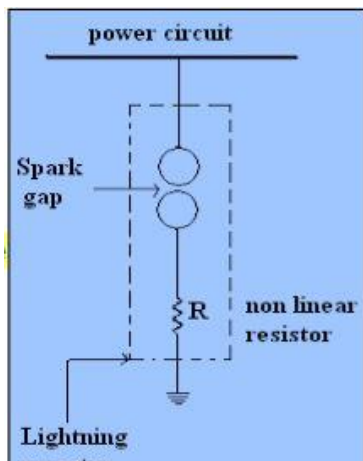


Figure 13-6 Valve Type LA

هو مانع من النوع الصمامي ، ويتكون هذا النوع من Non Linear Resistor Element مركب على التوالي مع Spark Gap كما في الشكل 13-6.

فأما الـ Non-linear Resistance فتكون قيمتها كبيرة جداً في الحالة العادية أى عند جهد الشبكة الطبيعي .

وأما الـ Gap Unit فيكون لديه فراغ Gap بمسافة معينة ، بحيث يكون الـ Arrestor غير قادر على توصيل التيار في الحالة العادية. وعند حدوث الصاعقة يزداد الجهد بصورة كبيرة و ينكسر عزل الهواء في الـ Gap و تصبح قيمة المقاومة صغيرة جداً و يتم تفريغ التيار للأرض.

وقد تم استخدام هذا النوع لعدة عقود من الزمن حتى ظهر النوع الثاني وهو الـ Metal-Oxide Arrestors في منتصف سبعينات القرن الماضي.

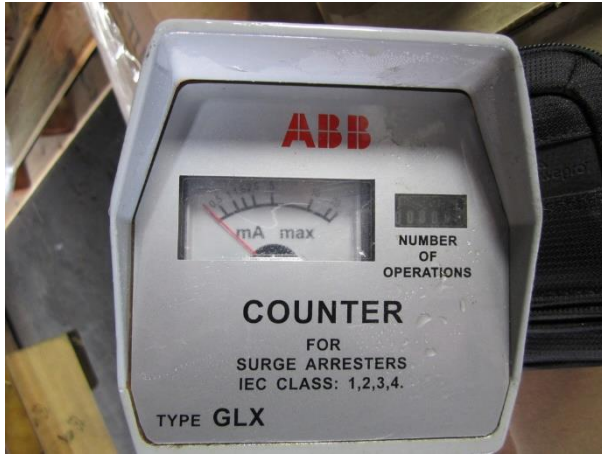
13.2.2 النوع الثاني : Metal-Oxide (ZnO) Arrestor

هو مانع يستخدم أكسيد الزنك ، ففي هذا النوع تم استبدال الـ Non-linear Resistance المصنعة من كربونات السيليكون Silicon-Carbide بأخرى من Metal-Oxide التي تتمتع بـ Non-linearity characteristics أعلى من نظيرتها. وتم أيضا الاستغناء عن Series Gap في هذا النوع و بذلك يكون قد قضى على مشكلة الحرارة المرتفعة التي كانت تنتج من حدوث breakdown لـ spark gaps ، كما يقلل من احتمالات الفشل التي كانت تحدث نتيجة لتغير الـ breakdown voltage الخاص بالـ spark gaps بسبب تغير أحد الظروف مثل الضغط أو درجة الحرارة أو التلوث.

و يصنع هذا النوع عادة من أكسيد الخارصين (Zinc Oxide) الذي يمتاز بانخفاض مقاومته عند قيمة محددة للجهد ثم استردادها مرة أخرى عند انخفاض هذه القيمة ، مما يوفر حماية و أداء أفضل للـ arrestor.

وتزود هذه الأجهزة بعدادات كما في الشكل 13-7 لقياس تيار الصاعقة و لحصر عدد المرات التي مرت فيها

الصواعق خلاله وهذه المعلومات هامة في تقييم صلاحية الـ LA.



و يجب تغير مجموعة الأقراص (التي تتكون منها المقاومة الغير خطية) الموجودة داخل مانعة الصواعق بعد عدد معين من مرات التفريغ و هذا العدد يتم تحديده بواسطة الشركة المصنعة. وإذا لم يتم استبدال و فحص الأقراص فقد نتقاجأ بحدوث صاعقة وتتهار مانعة الصواعق و المعدات معها.

كذلك يوجد عداد آخر لقياس تيار الـ SS

معاير بالمللي امبير ، وفي حالة زيادة هذا

التيار بمرور الوقت فإن هذا قد يكون مؤشرا للانهييار الحراري لمانعة الصواعق وعوازل الخط الكهربى أيضا.

Figure 13-7 عداد مركب على مانع الصواعق

علما بأن الـ LA قد يوضع أيضا ليس فقط عند نقطة دخول الخطوط الهوائية للمحطة بل أيضا يوضع مباشرة قبل المحول وذلك لوجود احتمال أن الصاعقة ضربت أى عنصر من عناصر المحطة الموجودة فى منطقة التفريعات (بالهواء الطلق) وبالتالي فهناك احتمال أن تصل للمحول (وهو العنصر الأهم والأعلى بمحطة المحولات) ولذا وجبت حمايته بـ LA إضافي كما في الشكل 13-8.



Figure 13-8 مانعة صواعق قبل الدخول على المحول الرئيسي

13.3 سكاكين الفصل ISOLATORS

سكاكين الفصل وتسمى أيضا بالمستعزلات Isolators ، وتسمى أيضا Disconnecting Switches ، وهي جهاز ميكانيكي يستخدم أساسا لإتمام عملية العزل التام لعناصر الدائرة عن مصدر الطاقة بغرض القيام بأعمال الصيانة أو بغرض عزل الخط .

وبالمحطة عدة أنواع من السكاكين كما فى الشكل 13-9 . فهناك سكينة الخط أو سكينة رأس الخط ، ورمزها فى الشكل السابق هو QL . وهناك سكينة أخرى تشبهها تماما ولكن تتركب جهة الـ BB ولذا تسمى سكينة الـ BB ، ورمزها على الشكل 13-9 هو (QL1 and QL2) . والهدف من هذه السكاكين هو إتمام عزل الخط بعد فتح القاطع . ففتح الـ CB مثلا لا يكفى لبدء أعمال الصيانة فيه ، فرغم أن الـ Contacts داخل القاطع نفسه قد أصبحت مفتوحة ، إلا أن الجزء الأول من هذه الـ Contacts لاتزال تتصل بالشبكة جهة الـ BB ، وهنا يأتى دور (QL1 and QL2) لإتمام عملية العزل من هذه الجهة ، كما أن الجزء الثانى من أطرافه لاتزال متصلة بالأحمال ، وهنا يأتى دور سكينة الخط QL التى تفتح لإتمام عزل الـ CB عن الأحمال .

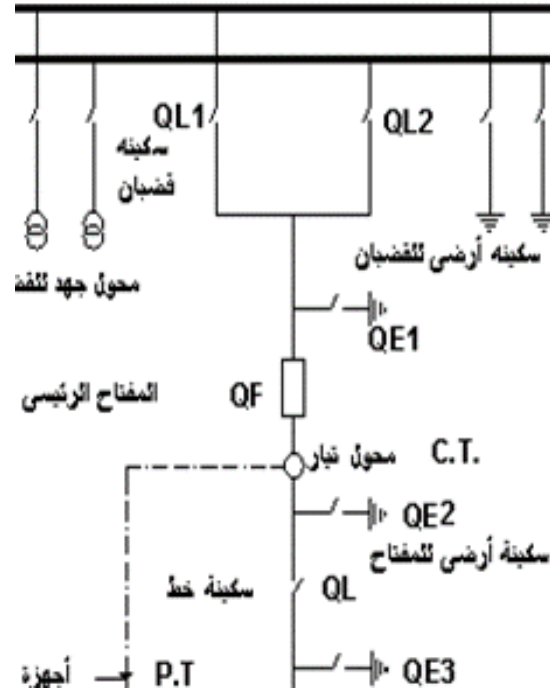


Figure 13-9 أنواع مختلفة من السكاكين

والفرق بين سكينة رأس الخط وسكينة الـ BB هو أن سكينة الخط تكون مزودة بمفتاح أرضي Earthing Switch من جهة الخط الهوائي ورمزها QE3 ، وتظهر في الشكل 10-13 ، فبمجرد أن تفتح سكينة الخط يتم أتماتيكيا توصيل هذه السكينة بالأرض. علما بأن تأريض الخط بهذه الطريقة يحقق فاعلية في حدود 2 كم من المحطة ، أما إذا امتدت منطقة الصيانة لأطول من ذلك فيجب عمل أرضي مؤقت في المنطقة البعيدة خارج المحطة .

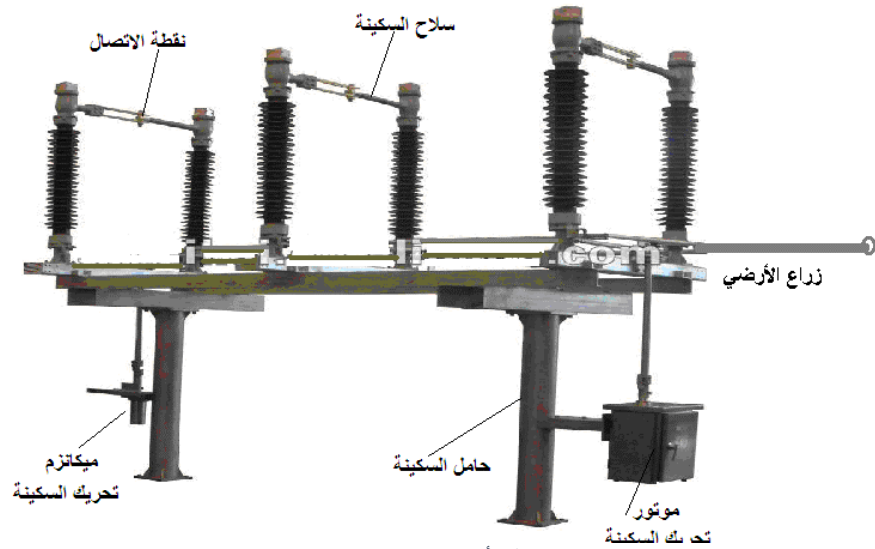


Figure 13-10 سكينة الأرضي

ويستطيع كلا النوعين من هذه السكاكين (Isolators) تحمل مرور تيار الـ short circuit current خلالها وهى مغلقة لمدة قصيرة ، ولكن لا يمكن فتحها إلا عندما يتم قطع التيار عن الدائرة بواسطة القاطع الأساسى ، أو أن تكون قيمة التيار قبل القطع صغيرة جداً حيث أن هذه السكاكين غير مزودة بأى وسيلة لإطفاء الشرارة الناتجة عن قطع تيار مرتفع كما هو الحال فى الـ CB ، وهو غير مهياً لذلك فلا يوجد به زيت مثلاً لإطفاء الشرارة كما فى الـ CB ، وبالتالي لا يمكن فتحه إلا بعد فتح الـ CB أولاً.

وهناك نوع ثالث من المفاتيح (السكاكين) وهو مفتاح التأريض لـ Earthing Switch الخاصة بالقواطع ، ويظهر فى الشكل 9-13 بالرمز QE1 and QE2 ويركب قبل وبعد القاطع لتفريغ أى شحنات. مع ملاحظة ضرورة وجود نظام قفل كهربى (Interlock) بين الـ CB وبين سكينتى التأريض (QE1 and QE2) ، بحيث يضمن عدم فتحهما إلا بعد فصل الـ CB أولاً لأنهما مثل كافة السكاكين غير مزودة بأى آلية لإطفاء الشرارة التى تنشأ عند الفتح . أما فى حالة غلق الـ CB فيجب أن تفتح أولاً سكاكين القاطع (QE1 and QE2) ثم يغلق القاطع بعد ذلك ، حتى لا يحدث Short circuit بالدائرة .

ولهذه السكاكين ميزة إضافية فى المحطات الهوائية حيث يمكنك من التأكد من تحقق العزل بالعين المجردة ، وذلك بعد إجراء فصل الدائرة بالقاطع CB .

يلاحظ أن سرعة الفتح والغلق للـ Isolators تكون دائماً أبطأ بكثير مقارنة بالقواطع حيث أنها أيضاً غير مزودة بآليات تسريع الفتح (سوسته مثلاً) كما هو الحال فى القواطع الرئيسية.

13.3.1 أساليب فتح سكاكين الفصل

تنقسم هذه السكاكين من حيث أسلوب الفتح إلى عدة أنواع (يتم الاختيار بينهم حسب المساحة المتاحة للفتح وطريقة التثبيت) منها:

- Vertical Break
- Double End Break
- Center Break
- Double End Break Vee Type

Vertical Break

تتكون السكينة فى هذا النوع من ذراع واحد يتحرك عمودياً ، و طرفا السكينة يكون كل منهما مثبت على عازل كما فى الشكل 11-13. و يتم فتح الدائرة عن طريق رفع الذراع لأعلى كما فى الصورة التى تبين شكل سكينة جهد 500 ك ف.

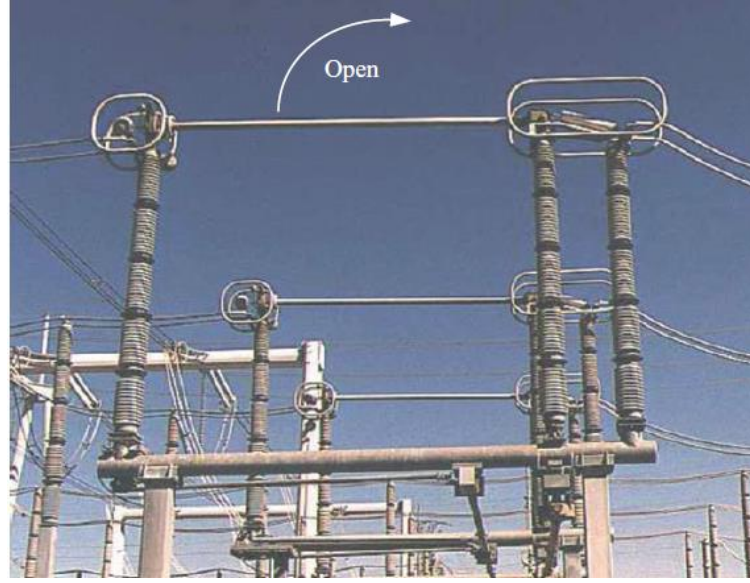


Figure 13-10 Vertical Break

Double End Break

تتكون السكينة من ذراع واحد يتم تحريكه من خلال العزل المثبت فى المنتصف (شكل 12-13) ، و يتم توصيل الدائرة عن طريق توصيل الذراع بالطرفين الثابتين (المثبتان أيضا بعوازل).

ويمتاز هذا النوع على الـ vertical switch بأنه يمكن استخدامه فى المواقع التى ليس بها مساحات فارغة فى الاتجاه الرأسى حيث يتم فصل الدائرة عن طريق تدوير الذراع أفقياً و ليس رأسياً.



Figure 13-12 Double end break

Center Break

فى هذا النوع تتكون السكينة من ذراعين متقابلين يتحركان فى اتجاهين مضادين و يتم توصيل الدائرة عن طريق تلامس الطرفين فى نقطة تكون تقريباً فى المنتصف (شكل 13-13).



وميزة هذا النوع عن النوعين السابقين (vertical break & double end break) هو أنه يتكون من عدد أقل من العوازل "two insulator/phase" بينما النوعان السابقان بهما three insulator/phase (فى هذا النوع يحمل كل عازل نصف الذراع المتحرك وليس كامل الذراع كما فى النوعين السابقين). و لكن من عيوبها أنها تتطلب مسافة أكبر بين كل phase و الآخر مقارنة بالنوعين السابقين.

و هناك أشكال أخرى من السكاكين مثل Double End Break Vee Type هو يشبه فى تصميمه الـ Double End Break ولكن العازلان المثبتان على طرفى السكينة مائلان كما توجد أشكال أخرى مثل Knee Type و Pantograph Type.

Figure 13-13 Center break

13.4 تسلسل عمليات الفصل و التشغيل فى المحطة

13.4.1 خطوات فصل خط هوائى (المغذى Feeder) يتبع الآتى:

1. فصل القاطع CB الرئيسي والتأكد من فصل الـ 3-Phases.
2. تفصل سكينة الخط الهوائية.
3. فصل سكينة القضبان .

ملحوظة هامة:

1 يراعى عند فصل أي كابل أن يتم الفصل من ناحية الحمل أولاً ، ثم من ناحية المغذى (المصدر) بعد ذلك ، منعا لمرور تيار خلال ساعات capacitance الكابل مما قد يؤدي لرفع الجهد كما ذكرنا سابقا فى الباب الثاني.

13.4.2 خطوات توصيل خط هوائي يتبع الآتى:

1. تفصل سكينه الأرضي للخط الهوائي مع التحقق من ذلك.
2. توصيل سكينه القضبان.
3. توصيل سكينه الخط الهوائية.
4. توصيل المفتاح الرئيسي والتأكد من توصيل الثلاث أوجه.

13.4.3 تشغيل مجموعتان من القضبان الرئيسية

- وفى حال وجود موصل قضبان وعند الرغبة في نقل جميع التوصيلات من القضبان الموجودة بالخدمة إلى الاحتياطية دون انقطاع التغذية يتبع الآتى:

1. توصيل سكينتي رابط القضبان.
2. توصيل موصل القضبان.
3. تقرأ الفولتميترات المركبة على مجموعة القضبان الاحتياطية للتأكد من وجود فولت عليها.
4. يتم التحقق من توصيل موصل القضبان.
5. توصيل سكاكين القضبان الاحتياطية لجميع الدوائر الموصلة إلى مجموعة القضبان الشغالة.
6. تفصل سكاكين القضبان الشغالة لجميع الدوائر الموصلة.
7. يقرأ الأمبير والميترات المركبة على موصل القضبان للتحقق من عدم مرور بين مجموعتي القضبان.
8. يفصل مفتاح رابط القضبان.
9. تفصل سكينتي رابط القضبان.

13.4.4 ما الفرق بين فصل الخط ، وعزل الخط ، وانسحاب الجهد؟.

نقصد بكلمة خط أى المغذى أو Feeder ، ويوجد فرق بين مصطلح "فصل الخط" ، ومصطلح "عزل الخط" على النحو التالى:

- أ. فصل الخط يعنى فتح القاطع CB ، و لكن تظل سكاكين العزل مغلقة (سكينه الخط و سكينه القضبان العمومية) وتظل سكاكين التأريض مفتوحة. وهذا السيناريو يحدث إذا جاءت إشارة الفتح من الـ Relay ، لأنه من الممكن أن يلى ذلك إشارة غلق من الـ Autorecloser ، فلو تخيلنا أن فصل الخط كان مصاحبا مثلاً فغلق سكاكين التأريض فهذا يعنى كارثة.

ب. عزل الخط (المغذى Feeder) يعنى فتح القاطع CB ، و فتح سكاكين العزل (سكينه الخط و سكينه القضبان العمومية) ، و غلق سكاكين التأريض فى أول الخط و نهايته. وهذا يحدث عن عمل صيانة للخط.

أما انسحاب الجهد فنقصد به حدوث انقطاع للتيار تلقائيا دون سابق تعليمات ، لا من الـ Relay ، ولا من مسئولى الصيانة على عكس ما حدث فى الحالتين السابقتين ، بل هو انقطاع للتغذية عن قضبان التوزيع و الخطوط الهوائية و الكابلات الأرضية و سائر المعدات الكهربائية دون سابق تعليمات وبدون حدوث عطل داخل المحطة .

وتعتبر هذه المعدات فى هذه الحالة فى حكم المغذاه ، ولا يجوز بأي حال من الأحوال الاقتراب منها أو العمل فيها أو إعادة تعشيقيها – إلا بعد الحصول على التصريح اللازم من الجهة المشرفة على تشغيل هذه المعدات (مركز التحكم المختص أو وردية المحطة).

13.5 محولات التيار Current Transformer

وهو من المعدات الأساسية بالمحطة ، حيث يقوم هذا النوع من المحولات بتحويل التيارات العالية إلى تيارات منخفضة عادة 1 أمبير أو 5 أمبير لنتمكن من التعامل مع هذا التيار بشكل آمن سواء فى أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية. ويتم تصنيف محولات التيار إلى (Classes) و ذلك حسب الاستخدام (للحماية أو للقياس).

و يركب الـ CT بشكل منفصل لاسيما مع الجهود العالية كما فى الشكل 13-14.



Figure 13-14 CT

لكن هناك شكل آخر من أشكال محول التيار وهو (BCT) Bushing Current Transformer، وفيه يتم تركيب الـ CT ضمن العوازل الخارجية Bushing للمحول أو القاطع.

ويتميز هذا النوع بميزة أساسية وهي أنه يمكن تركيبه على الخط أو محول القدرة أو القاطع الموجود بالفعل دون الحاجة لتركيبه منفصلاً . وذلك لأن الـ CB يركب على التوالي في الدائرة وكذلك الـ CT ولذا يركبا معا فيدخل الكابل على الـ CT ومنه (داخليا) إلى الـ CB ثم يخرج من الـ CB إلى سكة الـ BB كما سنرى.

وتتقسم محولات التيار لعدة أنواع طبقاً للمادة المستخدمة للعزل داخل المحول . وأهم تلك الأنواع:

Oil Insulated Type –1

SF6 Insulated Type –2

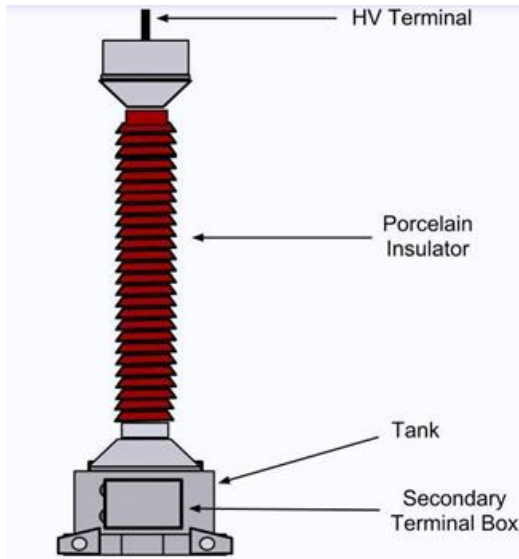
Dry Insulated Type –3

للمزيد عن محولات التيار وأيضا عن محولات الجهد يمكن الرجوع لكتاب نظم الحماية الكهربائية.

13.6 محولات الجهد

ويقوم هذا النوع من المحولات بتحويل الجهود العالية إلى جهود منخفضة (عادة 110 فولت) لنتمكن من التعامل مع هذه الجهود بشكل آمن مع أجهزة القياس أو أجهزة الوقاية . ومكوناته الأساسية تظهر في الشكل المجاور.

و يستخدم محول الجهد فيما يلي :



Sketch of Voltage Transformer

• تغذية أجهزة القياس مثل (Voltmeter)

(VAR meter Wattmeter،

• تغذية أجهزة الحماية (Protection Equipment)

• تغذية مسجل الأخطاء (Fault Recorder) ،

ووظيفة هذا الجهاز داخل محطة التحويل أنه

يسجل التيارات والجهود قبل وخلال وبعد

حدوث العطل ، وكذلك لحظة فصل القاطع ،

كما يسجل اللحظة التي تعطلت فيها الأجهزة.

• تغذية أجهزة التوافق (Synchronizers) حيث

يشترط في عمليات التوافق : تساوي الجهد ، تساوي التردد ، توافق الـ Phases and Sequences ،

و تستخدم في محطات التحويل لإغلاق الدائرة عن بعد من غرفة التحكم فقط



Figure 13-11 VT

والفرق بين نوعي محولات القياس (محول التيار ومحول الجهد) هو أن محول الجهد لا نحتاج معه لقطع الكابل كما في حالة محول التيار الذي يدخل التيار إليه من نقطة ويخرج من نقطة أخرى.

أما في محولات الجهد فيتم التوصيل من نقطة واحدة (توصيل على التوازي) كما في الشكل 11-13 بينما الطرف الثاني لمحول الجهد يكون عبارة عن سلك توصيل صغير المقطع (يحمل جهد لا يتجاوز 120 فولت وتيار ضعيف) وهذا السلك يتصل مباشرة بأجهزة الحماية والقياس داخل مبنى المحطة.

ومن أشهر أنواع هذه المحولات:

1. محولات الجهد الحثية (I.V.T). Inductive

VT كما في الشكل 13-15.

2. محولات الجهد السعوية (C.V.T) Capacitive

VT كما في الشكل 13-16.

يستخدم الـ CVT لخفض جهد الشبكة الفائق EHV إلى مستوى جهد معدات القياس و الحماية.

وتقوم فكرة الـ CVT على توصيل الجهد المراد خفضه على مكثفين على التوالي (شكل 12-13) فيكون بذلك الجهد على أحد المكثفين أقل من الجهد الكلي ثم نقوم بتوصيل ذلك الجهد على الملف الابتدائي للمحول و الذي بدوره يقوم بتخفيضه إلى القيمة المطلوبة. وهذا النوع أفضل اقتصادياً من محول الجهد العادي عند استخدامه على خطوط EHV & UHV.

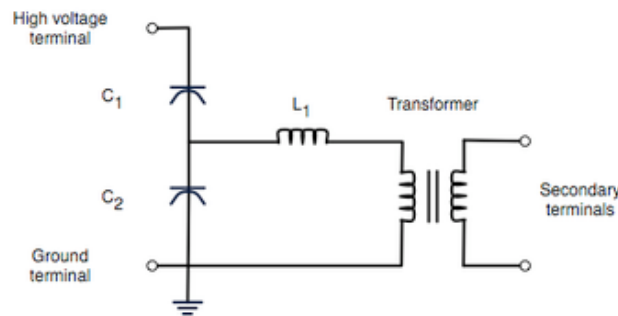


Figure 13-12 CVT

وقد أصبح شائعاً استخدام محولات الجهد السعوية CVT لسببين:

الأول: أنها أقل تكلفة عن محولات الجهد المغناطيسية .

الثاني: أن المكثف Capacitor الموجود بها يؤدي وظيفة أخرى حيث يعمل في نفس الوقت كمكثف ربط Coupling Capacitor لنظام الاتصال بالموجات المحمولة على خطوط نقل الطاقة Power Line Carrier PLC والذي أصبح استخدامه ضروريا لأغراض الاتصالات وربط أجهزة الحماية في المحطات بأجهزة الحماية في المحطات المقابلة والذي يطلق عليه Tele Protection. راجع تفاصيل ذلك في القسم الخاص بالاتصالات في الفصل الأخير من هذا الباب.

وتتعدد أشكال محولات الجهد حسب مكان استخدامه. فالصور السابقة تمثل محولات الجهد في المحطات الهوائية وفي الشكل 13-13 صور لمحولات الجهد في المحطات الغازية ولوحات الجهد المتوسط.

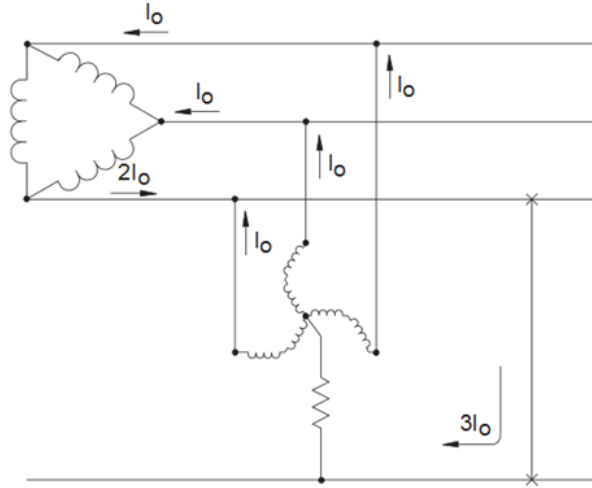


Figure 13-13 أشكال مختلفة لمحولات الجهد

13.7 محولات التأسيس (Earthing Transformer)

معظم محولات التوزيع تكون مؤرضة تأريضا مباشرا (Solid Earthing) أي بتوصيل نقطة التعادل مباشرة بالأرض مما يجعل تيارات الأعطال مرتفعة القيمة ، وذلك من أجل أن تميزها أجهزة الحماية بسهولة ولتقليل الإجهاد الكهربائي على العوازل والمعدات .

فإذا كان المحول موصلًا على شكل دلتا فيمكن تأريضه ولكن من خلال محولات التأريض التي تكون على شكل زجراج كما في الشكل 13-14 الذي يمثل مرور التيار خلال عطل أرضي من النوع الـ SLD والذي كان من المستحيل رجوعه للمحول سوى من خلال المكثفات الشاردة ، أما عند استخدام محول الزجراج فقد أمكن تمريره كما في الشكل. ويمكن الرجوع لكتابي المرجع في محولات القوى لمزيد من التفصيل حول هذه النقطة.



توصيلة الزجراج Figure 13-14

و محولات التأريض تستخدم عادة في محطات النقل الفرعية لأن المحولات فيها عادة تكون متصلة دلتا / ستار ، وقد نحتاج في جهة الدلتا لرفع قيمة الـ Zero Sequence Impedance لخفض قيمة التيار في حالة حدوث أعطال أرضية ، و لذا تستخدم محولات التأريض في هذه الحالة للحد من قيمة تيارات القصر الأرضية إلى قيمة التيار المقنن وتستخدم للتأريض فقط وليس للتحميل عليها.



Figure 13-15

ويمكن تمييز محولات التأريض بأن لها أربعة نقاط دخول فقط وليس لها خروج كما في الشكل 13-15. (المحولات العادية يكون لها نقاط دخول للجهد الابتدائي ونقاط خروج للجهد الثانوي).

ويتم تحديد الـ Ratings لهذه المحولات بحيث تتحمل مرور التيارات الأرضية لمدة أقصاها خمس دقائق ، ويجب أن تعمل أجهزة الحماية قبل ذلك بكثير ويتم توصيل هذه المحولات بأرضي المحطة.

13.8 القواطع Circuit Breakers

قاطع الدائرة هو المسئول عن فصل وتشغيل الدائرة أوتوماتيكيا بناء على إشارة من جهاز الحماية Protective Relay وذلك في حالة الأعطال الطارئة ، كما يستخدم لفصل وتوصيل التيار الكهربى للمعدات الكهربائية في الظروف الطبيعية أيضا عند الحاجة للصيانة أو التركيبات الإضافية ، ولكن الإشارة في هذه الحالة لا تأتي من الـ Relay ، بل تأتي يدويا للقاطع.

وأحد أهم ميزات القواطع هي القدرة على إطفاء الشرارة التي تحدث عند انفصال الجزء المتحرك (Moving Contact) عن الجزء الثابت (Fixed Contact) الموجودين داخل القاطع أثناء فصل الدائرة في الحالات العادية أو في حالة حدوث عطل. وتتميز الـ CB بهذه الميزة عن السكاكين التي ذكرناها سابقا.

و الشرارة التي تنشأ داخل القاطع تمثل أكبر عقبة تواجه تشغيل هذه القواطع ، وهي ليست مشكلة سهلة ، فعند انفصال الـ Contacts داخل القاطع يحدث فرق جهد بينهما (حسب جهد تشغيل القاطع) لكنه غالبا يكون كافيا لكسر العزل بين طرفى القاطع لاسيما أن المسافة بينهما صغيرة ، ومن ثم يمر تيار هائل بين طرفى القاطع على شكل قوس كهربى أو Arc ، وهذا التيار يتسبب في سخونة شديدة للمنطقة الواقعة بين الـ Contacts ، ومن ثم يتبخر الزيت مثلا (كما في القواطع الزيتية) ، أو يتأين الهواء بينهما (كما في القواطع الهوائية) ويكون الجهد كافيا لبقاء هذا القوس وبالتالى استمرار توصيل الدائرة ما لم نستخدم طرقا أخرى لتساعد القاطع على قطع الشرارة.

والعلاقة التالية تعطى فكرة عن حجم الطاقة الهائلة التى تتولد داخل القاطع لحظة تباعد الـ Contacts الخاصة به:

$$\text{القدرة الكهربائية بالشرارة (مقاسة بالكيلوجول)} = \text{قدرة القاطع (MVA)} \times \text{زمن الشرارة (بالثانية)} \times 0.1$$

على سبيل المثال لو كانت قدرة القاطع (Short circuit capacity) تساوى 500 MVA ، وزمن فصل الشرارة هو 0.04 sec ، فإن القدرة الكهربائية المستنفذة بالشرارة تساوى

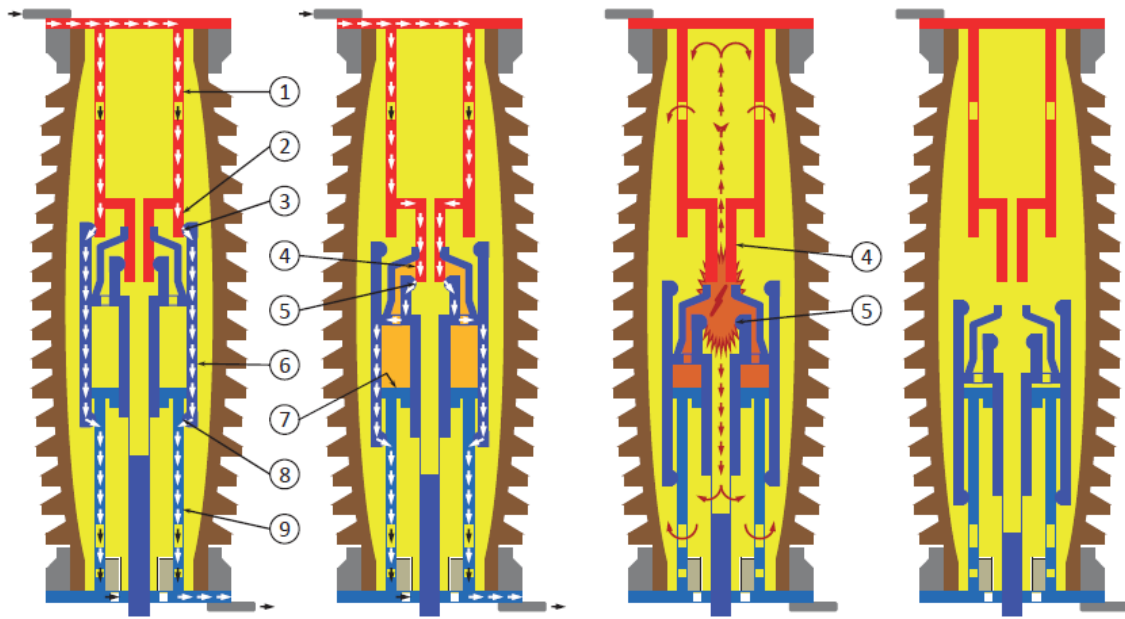
$$500 \times 0.04 \times 0.1 = 2000 \text{ k Joule}$$

وهي قيمة هائلة تستلزم أخذها في اعتبارات كثيرة منها المادة التى يصنع منها جسم القاطع.

نتذكر أن كيلو جول واحد يكفى لرفع درجة حرارة كيلوجرام من الماء درجة مئوية واحدة ونحن لدينا هنا 2000 كيلو جول.

13.8.1 أسلوب الفصل داخل القواطع الكهربائية:

القواطع عموما يحتوى فى داخله على نقاط تلامس ثابتة ، ونقاط متحركة كما ذكرنا. وإذا أردت تفصيلا أكثر نقول : أن النقاط المتحركة مكونة هي الأخرى من جزئين : الجزء الأول يمثل نقاط تلامس رئيسية Main Contacts يمر خلالها التيار فى الوضع العادى ، والجزء الثانى يمثل نقاط تلامس المساعدة Auxiliary Contacts يمر خلالها التيار فى اللحظة التى تسبق مباشرة عملية انفصال نقاط التلامس. ويمكن من الشكل 13-20 فهم هذه العملية :



آلية القطع Figure 13-20

فى وضع التوصيل الطبيعى (الرسم أقصى اليسار) ، تجد نقاط التلامس الثابتة (رقم 2) تلامس الجزء الأول من نقاط التلامس المتحركة الرئيسية (رقم 3). وعندما يأتى أمر بالفصل ، تجد أن النقاط 2 و 3 السابقتين قد انفصلا لكن بدون حدوث أى شرارة بينهما وذلك لأن التيار لا يزال يجد مسارا بديلا من خلال نقاط التلامس الثابتة (رقم 4) والجزء الثانى من نقاط التلامس المتحركة (رقم 5) ، كما فى الشكل الثانى من اليسار ويسميان بالأطراف المساعدة Auxiliary Contacts.

وهذه النقطة هامة جدا لأن عملية فصل الـ Main Contacts (2 و 3) بدأت فعليا وانتهت ولكن بدون حدوث شرارة فيهما ، مما يوفر حماية لهما من التآكل ومن ثم لا تتكون مقاومة عالية على سطحهما. وتستمر عملية الفصل فى الشكل الثالث لكن هنا تظهر الشرارة بين الأطراف المساعدة Auxiliary Contacts ، ويتدخل نظام إطفاء الشرارة (حسب نوع القاطع) ليتم بأسرع ما يمكن إنهاء هذه الشرارة حتى نصل للوضع المرسوم فى الجزء الأخير من الشكل 13-20.

13.8.2 الأجزاء الرئيسية بالقاطع

يمكن النظر للأجزاء الرئيسية بالقاطع من زاوية أخرى ، حيث يمكن القول أنها ثلاثة أقسام:

1. **حجرة الإطفاء (Extinguishing Chamber):** حيث يتم إطفاء الشرارة.

2. **الوسط العازل:** وهناك عدة أنواع من العزل:

- غاز الـ (SF6)
- الزيت
- الوسط المفرغ من الهواء

3. **قوة محرك (Mechanism):** تعمل هذه القوة على تحريك الجزء المتحرك في القاطع لينفصل عن

الجزء الثابت بسرعة ، حيث نحتاج في القواطع أن يكون زمن الفصل في حدود 50 ms وزمن

التوصيل في حدود 100 ms.

13.8.3 آليات الحصول على القوة المحركة:

هناك ثلاث آليات للحصول على الحركة القوية اللازمة لفتح القاطع:

• آلية تحريك زنبركية Spring Operated C.B (سوستة فقط تشحن يدويا أو بمحرك كهربى):

ويستخدم في هذا النوع محرك تيار مستمر أو متردد بحيث يقوم بشحن سوستة الزنبرك المستخدمة في عمليات الفصل والتشغيل . ومن الممكن تشغيل المفتاح يدويا في حالة وجود عطل بمحرك D.C مع ملاحظة وجوب فصل الجهد في هذه الحالة عن طرفي المفتاح وكذلك فصل تغذية الموتور .

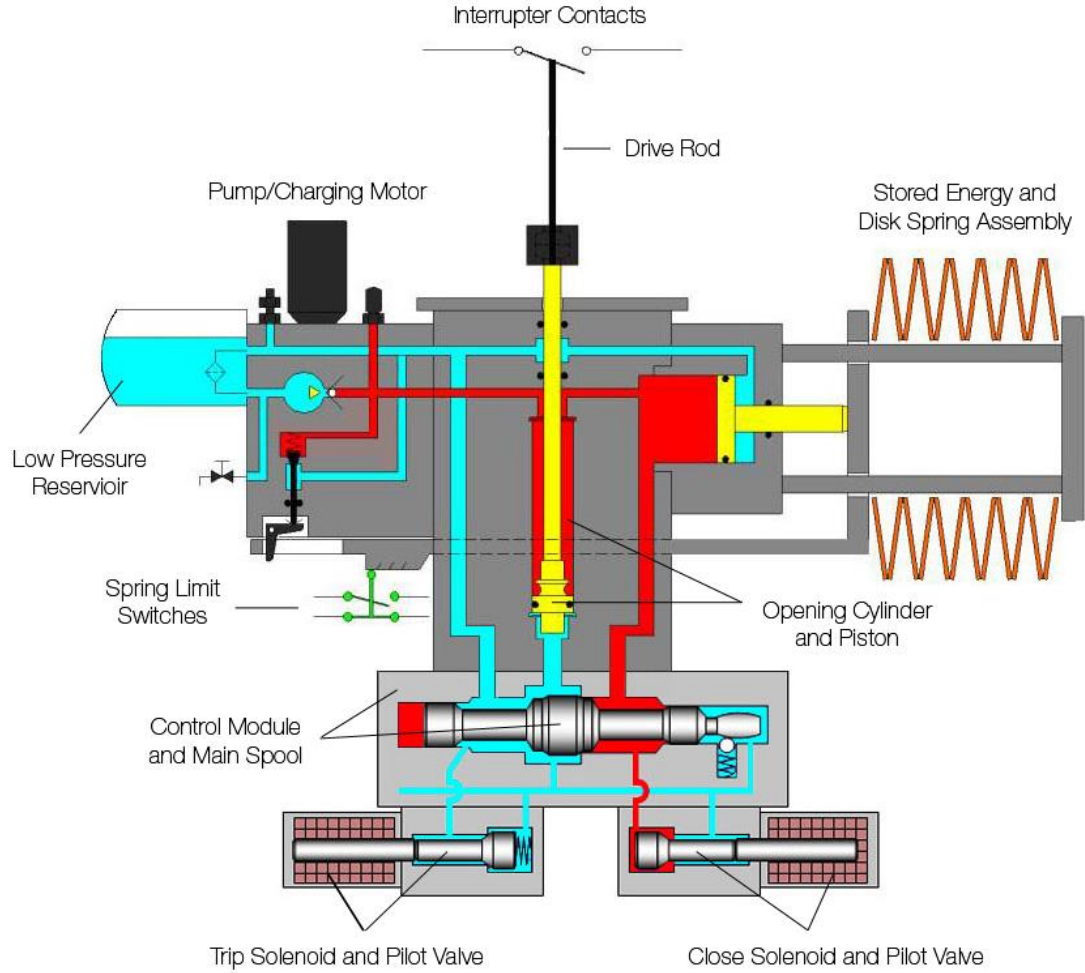
• آلية تحريك هوائية Pneumatic C.B

وهو يستخدم في المفاتيح الهوائية ذات الضغوط العالية (66/220 ك.ف) ويعتمد على الهواء المضغوط في الفصل والتوصيل حيث يصل هذا الضغط إلى 17 بار عن طريق الـ (Compressor) و عند الفصل أو التوصيل يتم تحرير هذا الضغط و توجيهه إلى المكبس (Piston) ويقوم هذا المكبس بدوره بتحريك الجزء المتحرك إما وصلا أو فصلا حسب الأمر المعطى.

• آلية تحريك هيدروليكية Hydraulic C.B

ويستخدم في المفاتيح التي يستعمل فيها غاز SF6 (الغازية) لإطفاء الشرارة ويعتمد على الزيت الهيدروليكي ذو المواصفات الخاصة . والصورة التالية تظهر السوستة spring وموتور الشحن وخزان الزيت.

وعموما ، فمعظم القواطع تكون عادة مزودة بآلية التحريك الزنبركي حيث تتميز بدرجة عالية من الأمان عند التشغيل وعمر افتراضى أطول وصيانة قليلة.



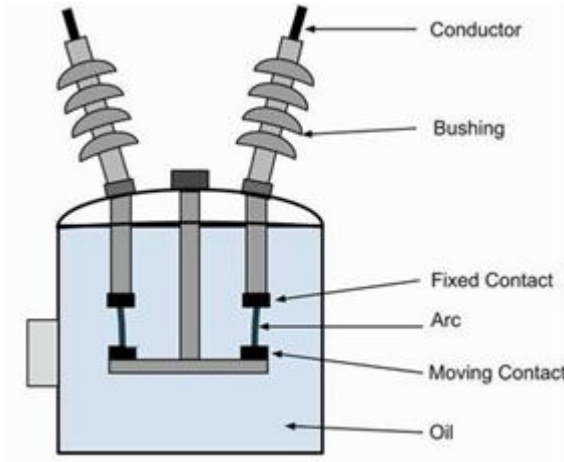
13.9 أنواع القواطع بالمحطات

هناك عدة أنواع من الـ CBS المستخدمة في محطات التحويل حسب قدراتها والجهود التي تعمل عليها ، منها :

- Oil C.B ويستخدم مع الجهود kV (3.6 - 12) .
- Air blast C.B ويستخدم مع الجهود kV (245-1000).
- Vacuum C.B ويستخدم مع الجهود حتى 36 kV.
- SF6 C.B ويستخدم مع الجهود kV (36-420).
- وهناك نوع آخر يسمى Air break C.B ، ويستخدم مع الجهود المنخفضة والمتوسطة حتى 12 kV.

13.9.1 النوع الأول : Oil CB

وفكرة عمله أنه عندما يتولد القوس الكهربى داخل القاطع بين الأقطاب كما فى الشكل المجاور فإنه تنتج طاقة حرارية تتسبب فى تحلل للزيت وبالتالي تتولد فقاعات غازية داخل الزيت . و بزيادة الضغط داخل القاطع تندفع



هذه الغازات المحبوسة وتسبب اضطراب في الزيت مما يؤدي إلى إطفاء القوس الكهربى.

والغازات الناتجة تتصاعد إلى أعلى الخزان وتخرج من فتحات التهوية أعلى الخزان ، ولذلك فإنه إذا كانت هذه الفتحات مسدودة فقد يحدث انفجار للخزان . علما بأن هذه الفقاعات تكون ذات ضغط عالى وهذا يولد ضغطا على جسم الخزان لذا يجب أن يكون جسم الخزان قويا ليتحمل هذا الضغط ، كما يجب ألا يُملأ الخزان بالكامل

بالزيت ، بل يجب ترك مساحة لهذه الفقاعات داخل الخزان .

ويعيب هذا النوع أن الزيت يكون قابلا للاشتعال عند درجة الحرارة العالية ، ويعيبه أيضا تكون الكربون بعد كل عملية إطفاء ، و بالتالى تزيد الحاجة إلى تبديل الزيت أو تنظيفه (بناء على نتائج اختبار الزيت الذى يجرى كل فترة). ولكن الزيت بصفة عامة عازل جيد ولا يحتاج لضغط ، كما يتميز بأنه عندما يسخن نتيجة مرور تيار عالى فيه - وهو ما قد يسبب تأين لبعض الذرات - تقل كثافته فيرتفع لأعلى ويحل محله زيت بارد غير متأين (تدوير طبيعى) ، وأحيانا يستخدم معه مضخة (Pump) حتى تبعد الزيت المتأين ليحل محله زيت جديد بارد .

ويوجد نوعان من هذه القواطع (شكل 13-21) هما :

- Bulk Oil C.B (Dead Tank)
- Minimum Oil C.B (Live Tank)

ففي القواطع الزيتية الأولى Bulk Oil تكون نقاط الفصل مغمورة بالزيت داخل خزان معدني كبير ، وتسمى القواطع ذات الخزان الكبير (dead tank breakers) . وسبب التسمية أننا نحتاج لعزل الأجزاء المكهربة داخله عن هذا جسمه المعدني ، ولذا يستخدم فيه كمية ضخمة من الزيت للعزل وليس فقط لإطفاء الشرارة. ولا يزال البعض منها في الخدمة كما في الشكل 13-22.



Figure 13-21

أما النوع الثاني فهو الأكثر انتشارا الآن ، حيث يستخدم الزيت في إخماد القوس الكهربائي فقط ، وليس كعازل كما في الـ Bulk Oil ، وفي المقابل يتم عزله برفعه عن الأرض من خلال Bushing كما في النموذج الأيسر من الشكل 13-21 ، و يكون جسم الخزان في هذا النوع مصنعا من مادة عازلة و معزولة عن الأرض ويسمى Live Tank و وبذلك تقل كمية الزيت المستخدمة داخل الخزان. ونظرا لقلة كمية الزيت المستخدم فإنه أيضا



Figure 13-22 Dead Tank

يسهم في الحد من خطورة وقوع الحرائق التي عرفت مع القواطع ذات الخزانات الكبيرة للزيت .

لكن القواطع الزيتية عموما تعاني من مشاكل كثيرة منها تسرب الزيت، وضعف مستوى العزل نتيجة تعدد مرات القصر ، و ارتفاع الضغط بداخله مع الفصل المتكرر نتيجة لتراكم أبخرة الزيت ويحتاج لصيانة دورية بمعدل مرتفع.

ملحوظة:

يجب عدم إعادة تشغيل قاطع التيار الزيتي إلا بعد مرور عشر دقائق على الأقل بعد فصل العطل ليسمح بتشتت الغازات المتولدة داخله وحتى يبرد الزيت.

كذلك يجب فحص الزيت بعد عدد معين من مرات التشغيل في حالة الأعطال.

13.9.2 النوع الثاني Air Blast CB :-

يستخدم مع هذا النوع من القواطع ضاغط هواء Air Compressor لدفع الهواء عند حدوث شرارة لإطفائها (شكل 13-23). ففي الظروف العادية يكون الهواء داخل القاطع الكهربائي مضغوطاً ، وهذا يعنى ارتفاع قيمة عزل الهواء (العازلية تتناسب طردياً مع الضغط) وبالتالي يمكنه تحمل جهد الشبكة على أطرافه ، ولكن عندما تنفصل نقاط التلامس داخل القاطع تتعرض الفجوة بينهما لمجال كهربائي عالي وترتفع درجة الوسط لتصل إلى آلاف الدرجات المئوية مما يتسبب في تأين الهواء العازل و حدوث القوس الكهربائي. عند ذلك يندفع الهواء المضغوط أصلاً داخله ليقطع الشرارة وتتنخفض درجة القوس الكهربائي وتختفي ظاهرة التأين ويتم قطع التيار. ولهذا النوع عدة مميزات عن القاطع الزيتي منها:

- لا وجود لأخطار الحريق التي يتسبب فيها الزيت.
- سرعة فصل فائقة.
- يحتاج إلى صيانة أقل من القاطع الزيتي.
- لكن له عدة عيوب منها:
- عند الحاجة لعمليات الفصل المتعددة يجب تواجد Air Compressor ذو سعة كبيرة لإعادة الضغط داخله لقيمته العالية بعد كل عملية تشغيل.
- هناك احتمالية لتسرب الهواء من مواسير التغذية.



Figure 13-23 Air CB

13.9.3 النوع الثالث : المقاطع المفرغ الهواء (Vacuum CB) :

في هذا النوع (شكل 13-24) لا يوجد هواء مطلقا في المنطقة المحيطة بأطراف المقاطع الداخلية وبالتالي فلن تحدث شرارة بداخله. فهذا المقاطع يتكون من اسطوانة مغلقة تحتوى على أطراف الوصل المتحركة داخل فراغ كامل ، فإذا تكون القوس الكهربائي نتيجة الفصل والاحتكاك فإنه سرعان ما يخمد لانعدام الوسط الداعم له كالزيت أو الغاز .

والقاطع يتكون من Arc chamber بداخلها نقط التلامس الثابتة والمتحركة ، ولكن يعيب هذا النوع من القواطع أنه إذا حدث أدنى تسرب للهواء داخل القاطع فإنه يؤدي إلى حدوث شرارة كبيرة وانفجار لأقطاب القاطع.

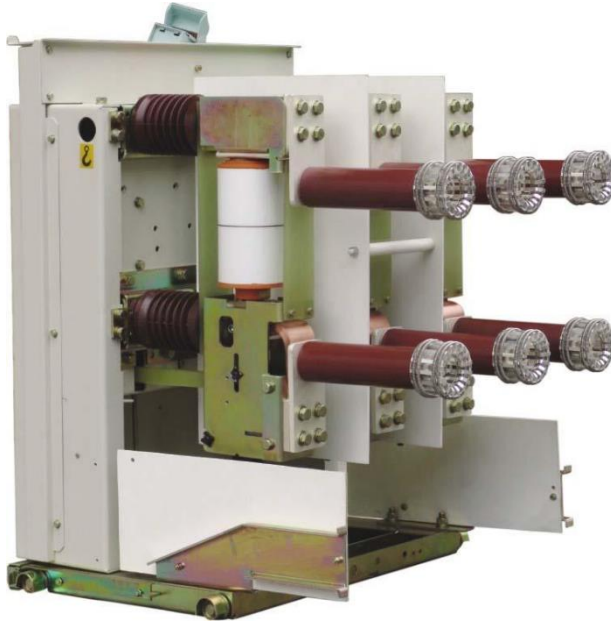


Figure 13-24 VCB

ويكثر استخدام هذا القاطع في محطات الجهد المتوسط حتى جهد 33 ك ف وليس أكثر من ذلك في الوقت الحالي.

يتميز هذا النوع بارتفاع عدد مرات الفصل المسموح بها خلال عمر القاطع عند التشغيل العادى ، وأيضا يتميز بارتفاع عدد المرات الفصل على القصر ، وغالبا يكون العمر الافتراضى لنقاط التلامس فيه من 50 إلى 180 مرة عند الفصل على القصر وحوالي " 10000 مرة عند الفصل بالتيار المقنن

العادى. علما بأن زمن التوصيل يكون تقريبا 75 مللى ثانية ، أما زمن الفصل فيتراوح بين 40 إلى 60 مللى ثانية.

مميزات أخرى للمقاطع المفرغ من الهواء

- صغر حجم الغرفة المفرغة التي يتم إطفاء الشرارة بها.
- زمن الفصل فى حدود نصف دورة لتيار القصر.
- شدة العزل لمقاومة انهيار الشغرة الهوائية الصغيرة كبيرة حيث تم استخدام الهواء المفرغ كوسط عازل.
- تتميز المفاتيح المفرغة بأنها الأقرب إلى المثالية.
- عدم احتوائها على سوائل قابلة للاشتعال أو غازات قد تتسرب.

- خفة الوزن و هدوء التشغيل.
- لا تحتاج الي صيانة.

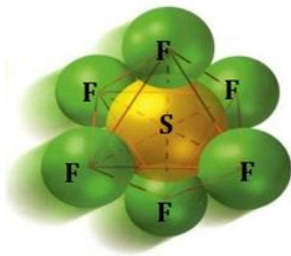
عيوب هذه القواطع:

- تتصاعد كمية من الغازات من القطبين الثابت و المتحرك عند درجات الحرارة العالية.
- قد يتعرض القطبين الثابت و المتحرك للانهييار او التآكل مما يعني استبدال الغرفة الزجاجية بالكامل.

13.9.4 النوع الرابع : قاطع دائرة باستخدام غاز الـ SF6

يتميز غاز الـ (SF6) (سادس فلوريد الكبريت) بعدة ميزات منها أنه:

- غاز خامل وغير قابل للاشتعال ، وغير سام ، ولا لون له ولا رائحة
- عازل جيد جدا للكهرباء حيث تصل كفاءة عزل الغاز المضغوط إلى عشرة أمثال عزل الهواء للكهرباء
- مستقر كيميائيا ، ولا يتحد مع أي مادة أخرى عند درجة حرارة الغرفة ، وبالتالي فإنه يحافظ و يحمي الموصلات من مشاكل الصدأ وغيره التي تحدث أثناء التشغيل كما أنه يحافظ على عمر الموصلات و الماكينات الكهربائية .
- هذا الغاز في الضغط الجوي الطبيعي تكون شدة عزله تساوي 2.5 مرة أفضل من الهواء ، وعادة يكون ضغط الغاز المستعمل 3-5 مرة ضغطا جويا وبذلك تكون خواص العازل أفضل عشرة مرات من الهواء .



- عمر هذا الغاز الافتراضي طويل
- وأهم خاصية لهذا الغاز أن الشرارة فيه تؤدي إلى تأين ذرات الـ (SF6) وهذه الأيونات الناتجة تتحد مع ذرات الـ (SF6) الأصلية وينتج عنها (SF6) جديد وبالتالي فالغاز لن يفقد عازليته. وبأسلوب آخر ، نقول أن غاز الـ SF6 يتحلل عند درجات الحرارة العالية الناتجة عن شرارة أو قوس كهربى ، و لكن

ذرات الكبريت و الفلوريد تتحد مجددا و تلقائيا مكونة مركبات سادس فلوريد الكبريد من جديد ، وهذا يعنى أن هذا الغاز لا يحتاج إلى إعادة ملاء أو استبدال بشكل دورى على فترات قريبة مثل ما يحدث مع الزيت.

بعض العيوب

1. غاز الـ SF6 هو أثقل من الهواء بحوالي 6 مرات ، ذلك يعني أنه قد يتجمع في قنوات الكابلات Cable Ducts أو في أسفل الخزانات . ومع أن الغاز ليس خطر عند استنشاقه لكنه إذا تجمع بكثرة فهناك خطر من الاختناق بسبب قلة الأكسجين.
 2. وعلى الرغم من الفوائد الجمة لغاز سادس فلوريد الكبريت فى المحطات الكهربائية إلا أنه يعتبر أحد أهم الغازات المسببة للاحتباس الحرارى و أكثرها ضررا بالبيئة. ففي اتفاقية حماية البيئة بكيوتو، تم إدراج غاز الـ SF6 كواحد من ستة غازات ينبغي تقليل استخدامها. و رغم أن انبعاث هذا الغاز قليل نسبيا إذا قورن بباقي الغازات ، إلا أن عمره الطويل فى الغلاف الجوى الذى يتجاوز 3200 سنة يجعله على رأسها من حيث الخطورة لأنه أكثرهم استدامة فى الغلاف الجوى للأرض.
 3. وهناك بعض الاحتياطات التي لابد من مراعاتها عند استخدام الغاز SF6 في CB's وهى أن غاز الـ SF6 لا يكون فعالا إلا عند وقوعه تحت ضغط عال ، لذلك يتم وضع جهاز لقياس الضغط على كل Circuit Breaker للتأكد من أن الضغط عند المدى الملائم.
- وعموما فإن المعدات الكهربائية المملوءة بغاز الـ SF6 موجودة بالخدمة منذ أكثر من 40 سنة وتجربتها في الخدمة الفعلية جيدة جداً.

13.9.5 ضغوط تشغيل قواطع الـ SF6:

1. التشغيل الطبيعي : ضغط الغاز بالمفتاح 7 بار
 2. ضغط الإنذار : 6.2 بار
 3. ضغط Blocking : 5 بار
- عندما يقل الضغط عن (5) بار فإن الغاز لا يستطيع إخماد الشرارة داخل قاطع الدائرة Circuit Breaker لذلك يصبح قاطع الدائرة مغلقا Blocked أتماتيكيا (أي أنه لا يمكن فتحه وذلك لمنع حدوث الشرارة) ويظل هكذا حتى يصل الضغط إلى المدى الآمن مرة أخرى. وغالبا يكون انخفاض الضغط مصاحبا بإعطاء إنذار صوتي.

- عند انخفاض الضغط يتم نقل أنابيب الشحن المملوءة بغاز الـ SF6 ، والمناخة في الـ Switch yard ، والتي تحمل غالبا على عربة إلى مكان العطل أو التسرب لتعبئة القاطع بالـ SF6 حتى مستوى الضغط المطلوب للتشغيل الآمن .
- هذا النوع من القواطع (مثله مثل أى قاطع آخر) يحتوى على لوحة توضع فى أسفله تبين وضع المفتاح "متصل أو مفصول" ، وكذلك تبين وضع السوسته هل هى مشحونة أم لا .
- وهو أيضا مثل كافة القواطع يكون منه نوعين Dead Tank كما فى الصورة شكل 13-26 ، التى تظهر قاطع SF6 – 500 kV ، ومنه أيضا الـ Live Tank الذى ظهر فى أول صورة لمحطة هوائية فى هذا الفصل.



Figure 13-26 SF6 CB

- ويوجد منه أيضا نوعان : خارجى وداخلى . وتركب القواطع الغازية فى الخارج فى محطات AIS (كما فى الصورة السابقة) ، كما يوجد منه القاطع الداخلى الذى يكون جزءا من الـ Bay فى محطات الـ GIS الداخلية.

ومن الميزات الأخرى للقواطع الغازية (SF6) التى تفسر تفوقها على بقية الأنواع :

- عدم الحاجة إلى ضاغط compressor والاعتماد على تقنية الدفع الذاتى للغازات .
- بساطة غرف الفصل التى لا تحتاج إلى غرفة إضافية على عكس القواطع القديمة التى تعمل بالهواء المضغوط.

- وقت قصير لفصل العطل من 2 إلى 2.5 دورة (cycles) تحت جهد فائق (EHV).
- يسيطر الـ SF6 على الـ Arc بسهولة لأن له خواص تبريد ممتازة في درجات الحرارة (1500-5000 كلفن) التي فيها تطفئ الـ Arc .
- قدرة تحمل كهربية تسمح بضمان عمر افتراضي لا يقل عن 25 سنة .
- الأمان عند التشغيل
- أصوات منخفضة عند التشغيل .

و أكثر أنواع الـ CBs استخداما في الوقت الحاضر هما الـ SF6 CBs ، و الـ Vacuum CBs ولذلك لطول أعمار الـ Contacts الخاصة بهم بالنسبة لعدد مرات الفصل في ظروف التشغيل الطبيعية أو الـ faults مما يجعلها لا تحتاج إلى الصيانة بشكل مستمر مثل الأنواع الأخرى ولذلك توصف هذه الأنواع بأنها " Maintenance free CBs " .

13.9.6 ما هو دور جهاز الـ anti-pumping relay ؟

في حالة الضغط على زر غلق القاطع يقوم القاطع بتنفيذ الغلق ، لكن ماذا لو كان هناك أمام القاطع short circuit؟ في هذه الحالة يقوم القاطع بالفصل فورا. لكن ماذا لو كان هذا الشخص حركة أصابعه بطيئة ، ولا يزال ضاغطا على زر التوصيل ؟ عندئذ ستكون هناك فرصة لتكرار التوصيل والفصل.

ولتفادي هذه المشكلة ولضمان عملية التوصيل لمرة واحدة في كل عملية ضغط ، فإن القواطع تزود بجهاز وقاية يسمى anti-pumping relay يقوم بقطع التغذية السالبة عن ملف التوصيل بعد التوصيل مباشرة و بذلك نضمن ألا يحدث تلف لموتور الشحن أو سوستة الفصل والتوصيل.

13.9.7 ملحوظات من الواقع:

- 1- في محولات 220/66 kV يكون قاطع المحول من النوع SF6 من جهة الـ 66 kV أصغر في الحجم من القاطع الموجود في جهة الـ 220 kV ، وذلك لأن الثلاث فازات تكون موجودة داخل ماسورة واحدة (تسمى في مصر بولة واحدة) وهو تعريب مصرى لكلمة Pole أو Pool ، ولكن ضغط غاز الـ SF6 يكون أعلى في قواطع الـ 66 kV بسبب وجود الـ 3-Phases داخل البولة الواحدة .
- 2- قيمة الـ Short circuit capacity للمفاتيح المستخدمة في مصر حسب الجهد هي:-

• 40 KA في مفتاح الـ 220 kV

• 31.5 KA في مفتاح الـ 66 kV

• 26.3 KA في مفتاح الـ 11 kV

وأعتقد أنه يجب إعادة النظر في هذه القيم على ضوء تزايد قدرات التوليد التي دخلت مؤخرا في الشبكة.

4- معظم قواطع الجهد المتوسط تتركب داخل خلايا لوحات التوزيع و تتميز بأنها حرة الحركة حيث يمكن إدخالها وإخراجها عن طريق وسائل عدة مثل عربة التحميل . ويوجد أنواع أخرى نجد فيها القاطع مجهزة بعجل Rolling يساعد في عملية سحبه وتحريكه بسهولة كما في الصور شكل 13-27.



قاطع تيار محمول علي عربة

قاطع تيار على عجل قابل للسحب

تحريك القواطع Figure 13-27

5- وهذه قيم لأهم الضغوط بالمحطات سواء للغاز أو للزيت وذلك للقواطع والسكاكين أيضا:

SF6 rated pressure	7 bar
Sf6 pressure first alarm	6.2 bar
Sf6 pressure second alarm (Blocking)	5 bar
Oil rate pressure	336 bar
Oil low pressure	316 bar

Oil locking pressure	264 bar
Oil locking trip	250 bar
Disconnectors & Earth switches	
SF6 rate pressure	4 bar
Sf6 low pressure first alarm	3.2bar
SF6 locking pressure second alarm	3 bar

13.9.8 توصيف الـ Circuit Breakers :

يتم توصيف الـ CB طبقاً للعناصر التالية:

Rated Voltage – 1

و هي تساوى أكبر قيمة لجهد المنظومة System Voltage فى الظروف الطبيعية . والقيم

القياسية هي (مقاسة بالـ kV) :

3.6 – 7.2 – 12 – 17.5 – 24 – 36 – 52 – 72.5 – 100 – 123 – 145 –
170 – 245 – 300 – 362 – 420 – 550 – 800

Rated Normal Current, I_n – 2

و هي قيمة الـ R.M.S Current التى يمكن أن يتحملها القاطع باستمرار فى الحالات العادية.

According to IEC60059 the standard values of rated normal currents are:

630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 A

Rated Short Circuit Breaking Current (S_{ic}) – 3

و هي أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن يمر بالقاطع لحظة فصله دون حدوث تلف للقاطع وغالباً يكون فى حدود عشرة أمثال التيار المقنن للقاطع. (يسمى أيضاً $I_{Breaking}$).

Rated Short Circuit Making Current (I_m) – 4

ويسمى (I_{making}) ، و هي أعلى قيمة لتيار short circuit يمكن أن للقاطع أن يغلق عليه فى وجود Short Circuit بدون أن يحدث له ضرر . عادة تكون قيمته مقارنة بالقيمة فى

البند السابق كما يلى: $I_{making} = 2.55 I_{Breaking}$

Rated short circuit current, I_{CU} – 5

هو أقصى قيمة لتيار القصر يمكن أن تمر في أجهزة القطع وهي مغلقة لمدة ثانية واحدة أو 3 ثواني بدون حدوث أي تلفيات في القطع.

 I_{CS} ، التيار التشغيلي للقواطع – 6

وهو التيار الذى يتحمله القاطع ثلاث مرات متتالية يفصل بينهما ثلاث دقائق ويجب اختبار القاطع بعدها .

وهناك مصطلحات هامة أخرى يجب توصيفها مثل Re-striking Voltage وتجد تفاصيلها فى الباب السادس (الفصل 28) عند الحديث عن الجهود العابرة بالشبكات ، فيحسن الآن الذهاب إليها.

13.10 الاختبارات التي تتم على قواطع الجهد العالي والمتوسط

الغرض من هذه الاختبارات هو التأكد من مدى تطابق مواصفات القاطع مع أدائه ، والتأكد من مدى صلاحية القاطع لإدخاله إلى الخدمة. و توجد أنواع مختلفة من الفحوصات منها:

13.10.1 الفحوصات العامة للقواطع

- 1- اختبار سلامة الملامسات **Contacts** العلوية والسفلية للقواطع من أجل التوصيل الجيد داخل غرفة إطفاء الشرارة.
- 2- التأكد من سرعة الفتح والغلق الميكانيكي للقاطع.
- 3- سلامة مفتاح حدود الشحن **Charging Limit Switch** .
- 4- سهولة إدخال وإخراج القاطع .
- 5- عمل السخان الموجود داخل حجرة القاطع بصورة صحيحة (يستخدم مع القواطع الزيتية حتى لا ترتفع لزوجة الزيت فى الأيام الباردة).
- 6- التأكد من التأريض.

الاختبارات التشغيلية Operation Tests

في هذا الفحص يتم التأكد من سلامة مفاتيح التشغيل للقاطع ، حيث يتم التأكد من عمل القاطع بالضغط على مفتاح التشغيل ثم يتم الضغط على مفتاح الفصل ثم يتم التأكد يدويا من عمل سوستة الشحن حيث يتم شحن القاطع يدويا من خلال يد مخصصة لذلك.

فحص الأقفال الميكانيكية Mechanical Interlock

يتم التأكد من عدم إمكانية إدخال وإخراج القاطع وهو في حالة الغلق ، وعدم إمكانية تأريض المغذي والقاطع في موضع الخدمة ، إلى آخره من الأقفال **Interlock** المتداخلة الميكانيكية الموجودة بالقاطع لتجنب الوقوع في الخطأ وحوادث الكوارث.

فحص الأقفال الكهربائية Electrical Interlock

يجرى التأكد من عدم إمكانية غلق القاطع جهة الجهد العالي للمحول عندما يكون القاطع في جهة الجهد المنخفض مؤرضا. أيضا يتم اختبار التشغيل اليدوي **OFF/ON** والتشغيل الكهربائي للقاطع. **Local and Remote** ، واختبار شحن القاطع يدويا وكهربيا.

13.10.2 اختبارات قوة العزل بالقاطع

يجب إجراء فحص قوة العزل على القواطع الكهربائية لمعرفة شدة مقاومة العزل الموجودة بين أقطاب القاطع بعضها البعض ، وبينها وبين الأرضي ، وكلما زادت مقاومة العزل بين الأجزاء الحاملة للفولتية وبين الأجزاء الميتة أي الأجزاء الغير حاملة للفولتية يكون القاطع جيد جدا. وقوة العزل تقاس في حال كون القاطع في الوضع **ON** أو في الوضع **OFF** .

يتم تشغيل القاطع فيحدث تلامس بين الـ **Moving and fixed parts** داخل القاطع ، وباستخدام الميجر يتم قياس قوة العزل بين الأقطاب وبعضها ، وكذلك قوة العزل بين الأقطاب وجسم القاطع.

- قوة العزل بين أقطاب القاطع وجسم القاطع يجب أن تكون أكبر من 500 ميغا أوم (أو القيمة المحددة في الكتالوج)
- قوة العزل بين أقطاب الـ **Phase** الواحد **R-R** مثلا في حدود 10 كيلو أوم أو أقل أثناء الغلق.
- قوة العزل بين أقطاب القاطع المختلفة يجب أن تكون أكبر من 500 ميغا أوم

تعاد نفس الاختبارات السابقة ولكن مع وضع القاطع في الوضع **OFF-position** وهنا يجب أن تعطى كل الاختبارات السابقة قيما أكبر من 500 ميغا أوم.

والشكل 13-28 يظهر شكل توصيلات الاختبارات.

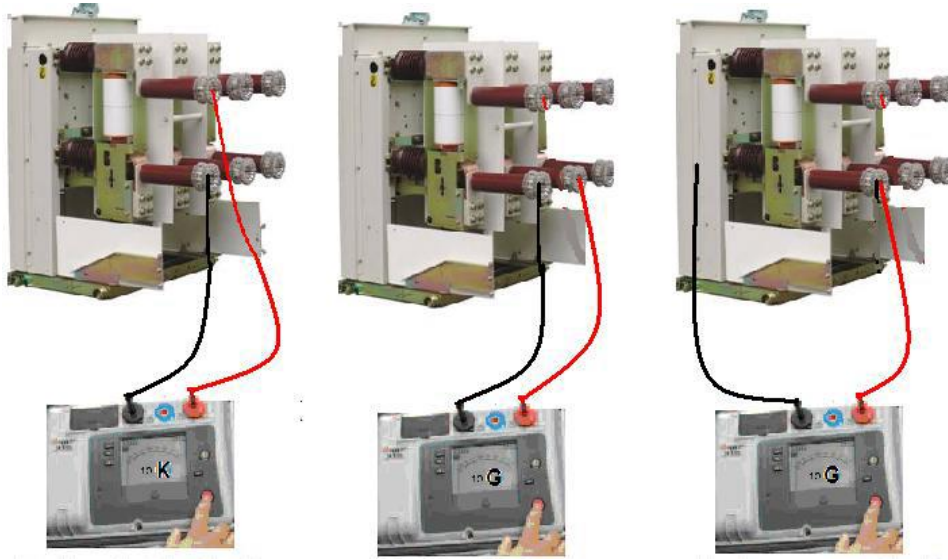


Figure 13-28 اختبارات قوة العزل

13.10.3 فحص مقاومة التلامس بين أقطاب القاطع المغلقة

يستخدم جهاز ما يـكـرو-أوم ميتر لقياس مقاومة الـ **Contacts** الخاصة بالقاطع ويتم قياس مقاومة كل **phase** على حدة ، و تتراوح قيمة مقاومة نقاط التلامس للقاطع عند جهد 11 ك ف حول $12-60 \mu\Omega$ أما قواطع الـ 33kV فتتراوح حول $100-25 \mu\Omega$.

وكلما كانت قيمة مقاومة الأقطاب المغلقة قليلة كلما قل قيمة هبوط الجهد وتحسنت مواصفات القاطع ، أما إذا كانت مقاومة تلامس الأقطاب عالية (أي فيها رخاوة) فإنها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأقطاب أثناء مرور التيار الكهربائي فيها ويؤدي إلى تآكل الأقطاب وربما يؤدي في النهاية إلى انفجار الأقطاب .

الشكل 13-29 يمثل جهاز المايكرو-أوميتر، وتقاس المقاومة عن طريق إمرار تيار مستمر في أقطاب القاطع مقداره 100 أمبير وقياس مقدار الجهد على الأقطاب بواسطة فولتميتر موجود أيضا داخل الجهاز ثم بتقسيم الجهد على التيار يتم حساب المقاومة ويظهر قيمة مقاومة تماسك الأقطاب على شاشة الجهاز.

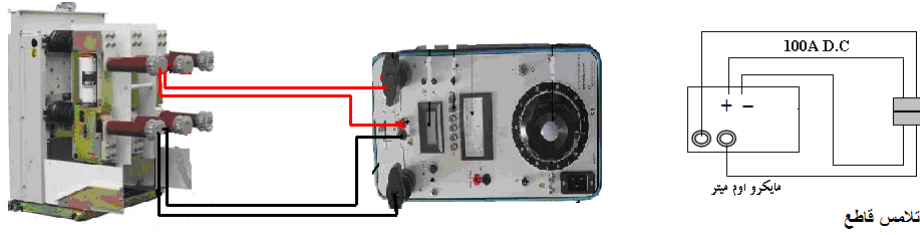


Figure 13-29 قياس مقاومة التلامس في القاطع

13.10.4 اختبار زمن الفصل والتوصيل وجهد التشغيل:

يتم هذا الاختبار على ملف الفصل وملف التوصيل . والهدف من هذا الاختبار هو معرفة زمن الفصل ، وأيضاً معرفة أقل جهد يمكن أن يعمل عنده ملف الفصل وملف التوصيل بحيث لو حدث وانخفض جهد البطاريات عن جهد التشغيل العادي بنسبة معينة نكون قد ضمنا عمل ملف الفصل لفصل القاطع عند حدوث أي عطل . ويهدف هذا الاختبار أيضاً للتأكد من أن المفاتيح تعمل ميكانيكياً بطريقة صحيحة وأن الفازات الثلاثة تعمل معا في نفس اللحظة .

ويتم هذا الاختبار كالتالي:

- بالنسبة للمفاتيح الجديدة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح عندما يكون الجهد على أطرافه مساوياً لـ 80% من جهد الـ D.C المقنن ، ويقاس زمن الفصل أيضاً عند 60% من جهد الـ D.C
- بالنسبة للمفاتيح القديمة: يتم اختبار زمن الفصل والتوصيل للمفاتيح فقط عند 100 % من جهد الـ D.C و يلزم تساوي الزمن للأوجه الثلاثة.

اختبار الفصل الحراري :

- حيث يتم توصيل أطراف القاطع على التوالي ثم يتم توصيل القاطع بجهاز الفحص ليتم حقن تيار (ضعف التيار المضبوط عليه القاطع) ويحسب الوقت الذي يتم عنده حدوث الفصل **The Trip** ، وبعد ذلك يضرب الناتج في معامل درجة الحرارة **Temperature Factor** لدرجة الحرارة التي تم عندها الاختبار، ودرجة الحرارة المسجلة على منحنى خواص القاطع، ويتم عمل المقارنة.

اختبار القصر :

- يتم عمل قصر على **2 Poles** من القاطع وبعد ذلك يتم حقن تيار بالقاطع حسب تيار القصر للقاطع $5I_n$ على سبيل المثال، ويتم اختبار سرعة الفصل عند حدوث القصر والتي تقدر 0.01 ثانيه تقريباً.

13.10.5 اختبارات تسلسل التشغيل

كما نعلم فإن القاطع معرض للفصل والتوصيل تحت الحمل وأثناء العطل بصورة متتابعة وأحيانا في زمن قصير للغاية ، وبالتالي فنقاط التماس معرضة للسخونة والتلف في حالة التشغيل المتتابع السريع ، ولذلك يتم اختبار تحمل القواطع وفقا لتسلسل معين . وفيما يلي واحد من أنظمة الاختبارات هذه :

O – 0.3s – CO – 3min – CO

حيث

- حرف الـ O تعنى فتح القاطع Open
- حرف الـ C تعنى إغلاق القاطع Close
- أما وجود الرمز CO فتعنى عملية غلق ثم فتح مباشرة
- زمن الثلاث دقائق تعنى زمن إعادة شحن سوسته القاطع
- أما الـ 0.3 sec فتعنى زمن إعادة التشغيل

وبالتالى يمكن أن نقرأ التسلسل السابق كما يلي: فتح القاطع ثم بعد زمن تأخير قدره 0.3 sec يتم عمل غلق وفتح متتابعة ثم يترك 3 دقائق ثم عملية غلق وفتح متتابعة أخرى.

الجزء الثاني من الفصل الثالث عشر

منطقة الجهد العالي في محطات الـ GIS

يحتوي هذا النوع من المحطات على كافة المعدات الموجودة في المحطات الهوائية السابق ذكرها مثل القواطع (Circuit Breakers) والقضبان (Bus-Bars) والعوازل (Isolators) ومحول التيار (CT) ومحول الجهد (VT) ، والفرق أن هذه العناصر تكون في محطات الـ GIS مغمورة بمادة الـ (SF6) داخل أوعية معدنية (Metal Housing) . مع ملاحظة أن المعدات الداخلية لا تتلامس مع هذه الأنابيب فهي معزولة تماما عنها.

والشكل 13-30 يمثل صورة لمنطقة الجهد العالي في محطات الـ GIS . لاحظ في الصورة ظهور نفس الرموز التي استخدمت في شرح الـ SLD للمحطات الهوائية. وقد سبق الإشارة لبعض من سمات غاز الـ SF6 عند الحديث عن SF6- CB ويفضل مراجعتها الآن.



Figure 13-30 GIS

13.11 المهام في محطات GIS

تتكون منطقة الجهد العالي في هذه المحطات (H.V switch gear) من: High Voltage Bus Bar ، تتصل عليه مجموعات من الـ Bays وهي :

1- Incoming Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الدخول للمحطة من الشبكة العامة.

2- Outgoing Bays وتشتمل على الـ Switchgear الخاص بمغذيات الخروج إلى محولات المحطة أو إلى الشبكة العامة.

والشكل 13-31 يمثل هذه المكونات.

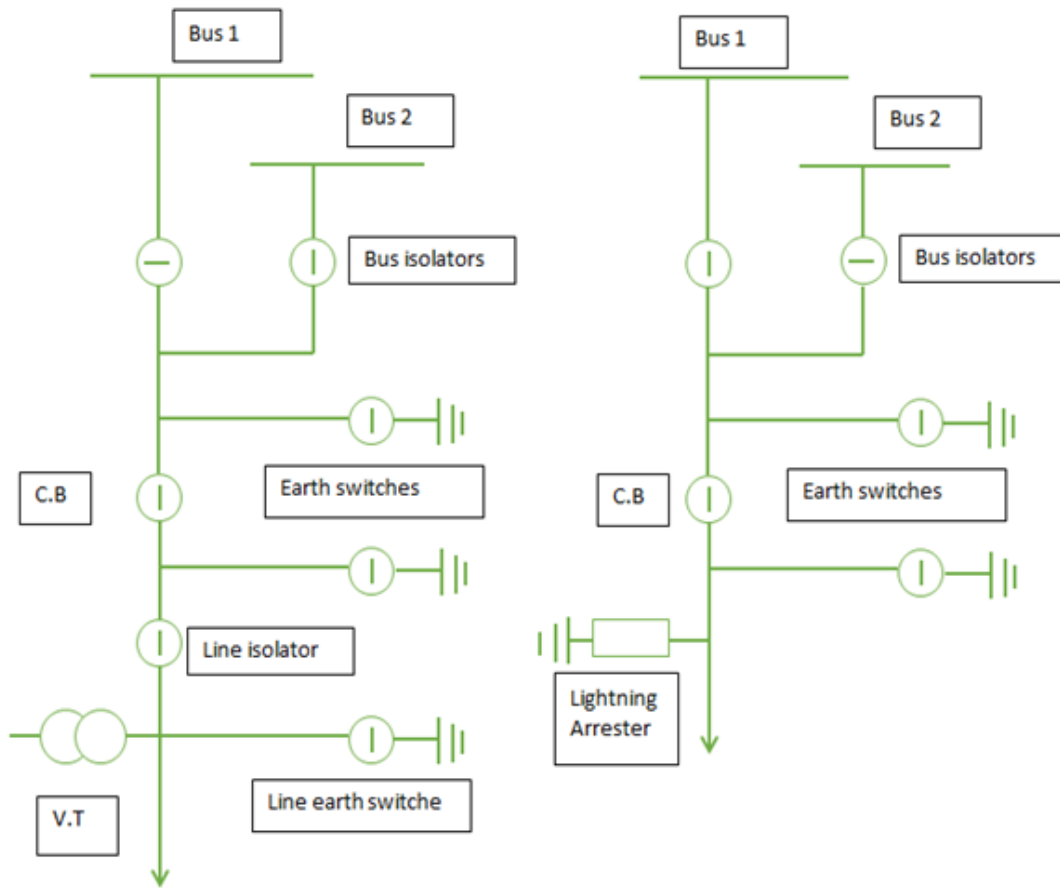


Figure 13-31 GIS outline

Left Part: Incoming Bay
Right Part: Outgoing/Transformer Bay

13.11.1 مكونات الـ Bay

داخل الـ Bay توجد مجموعة معدات الـ Switchgear التي يدخل عليها Incoming /outgoing feeders قبل أن تتصل بالـ BB ، وتشتمل على قاطع CB ، و محول تيار CT ، ومحول جهد VT ومفتاح تأريض ES وسكينة DS تماما كما في دوائر المحطات الهوائية ، لكن مع فرق في الحجم والشكل والذي يبدو في شكل 13-32 التي تمثل Bay واحد . حيث تدخل عليه كابلات الدخول من أقصى يمين الصورة (يمكن أن تدخل أيضا الخطوط الهوائية كما في الشكل 13-35 الذي سيأتى لاحقا) ويمر على المعدات التي ذكرناها وتنتهي على قضبان التوزيع.

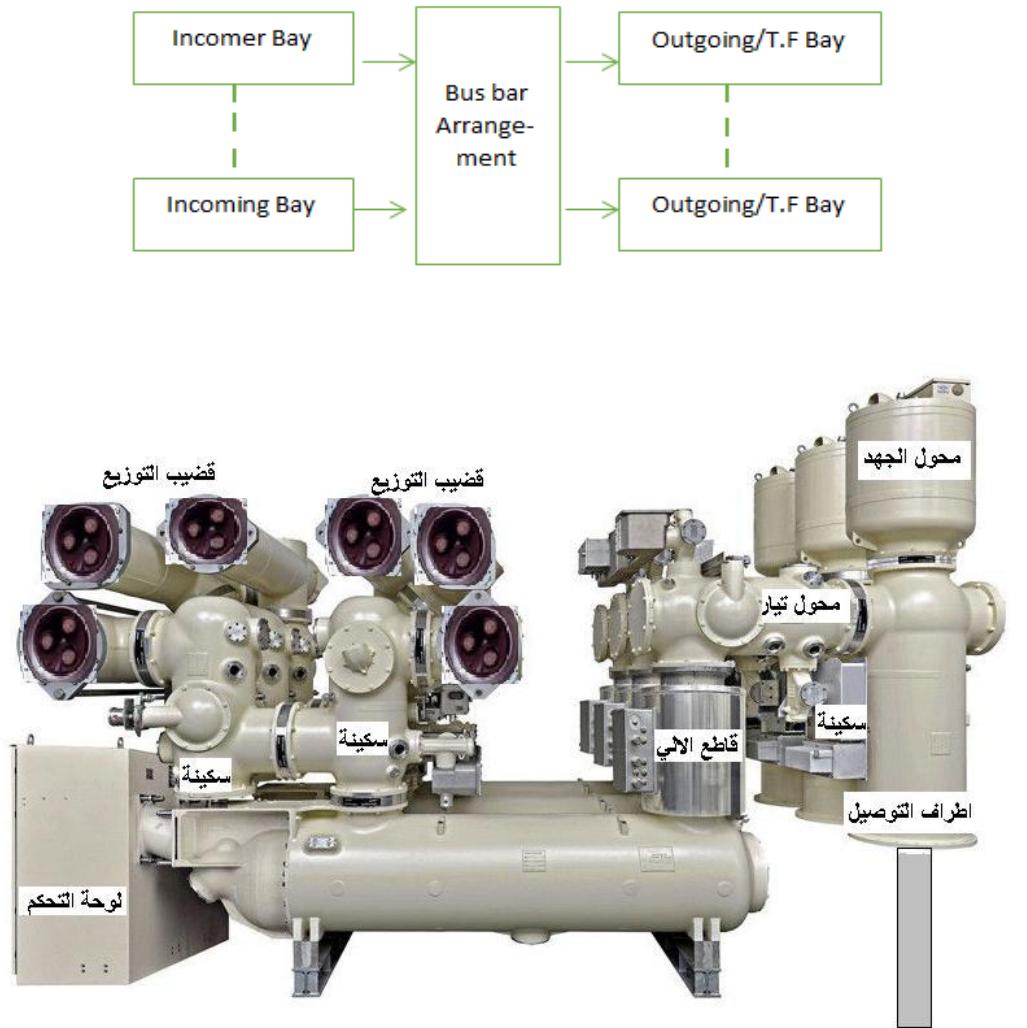


Figure 13-32 GIS Bay

والشكل 13-33 يمثل تفصيل ما بداخل هذه المواسير .

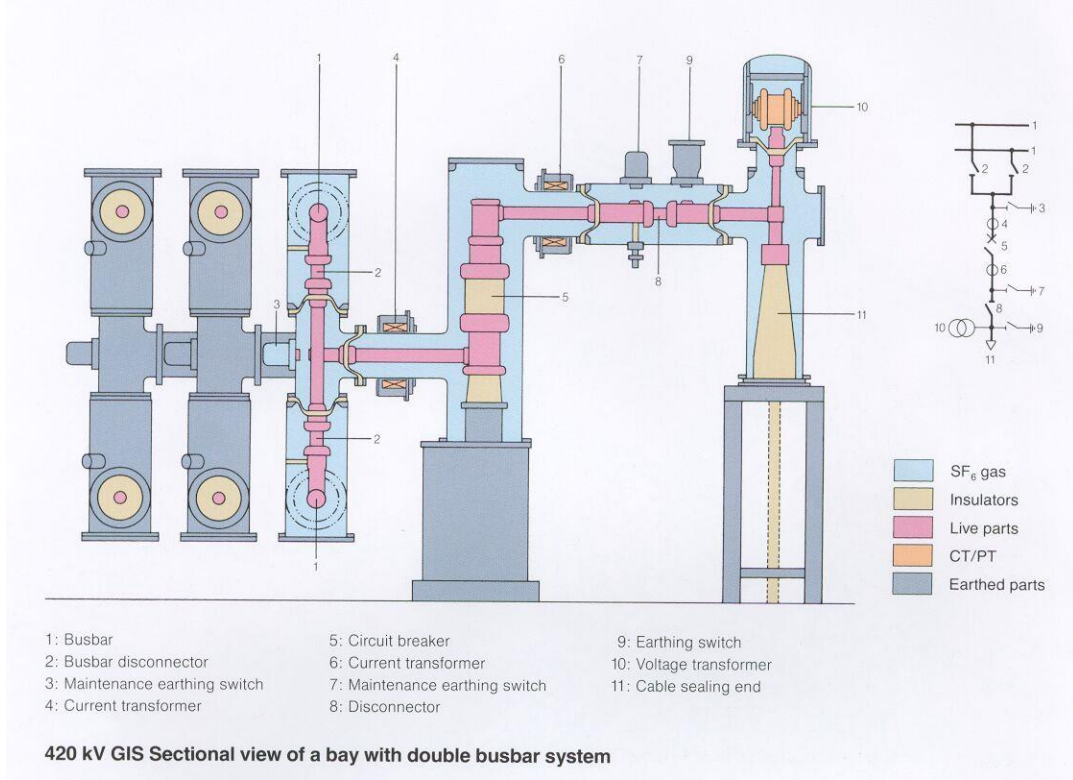


Figure 13-33 Inside the Bay

ويراعى فى تصنيع وحدات الـ CT and VT داخل هذه المواسير أن يتم عمل نوع من التحجيب shielding لهذه العناصر منعا لظهور تيارات حثية Induced currents تؤثر فى دقة قراءاتها.

والشكل 13-34 يبين مخطط Plan لعنبر الـ HV Switchgear فى المحطات الغازية جهد 66 ك ف .

وواضح من المخطط أن لدينا 3 خطوط دخول/ خروج وهى التى تخترق جدار المحطة ثم لدينا عدد 12 Bays وهذه قد تكون متصلة بمحولات المحطة من خلال كابلات أرضية وغالبا سيكون منها واحدة أو اثنتين احتياطى.

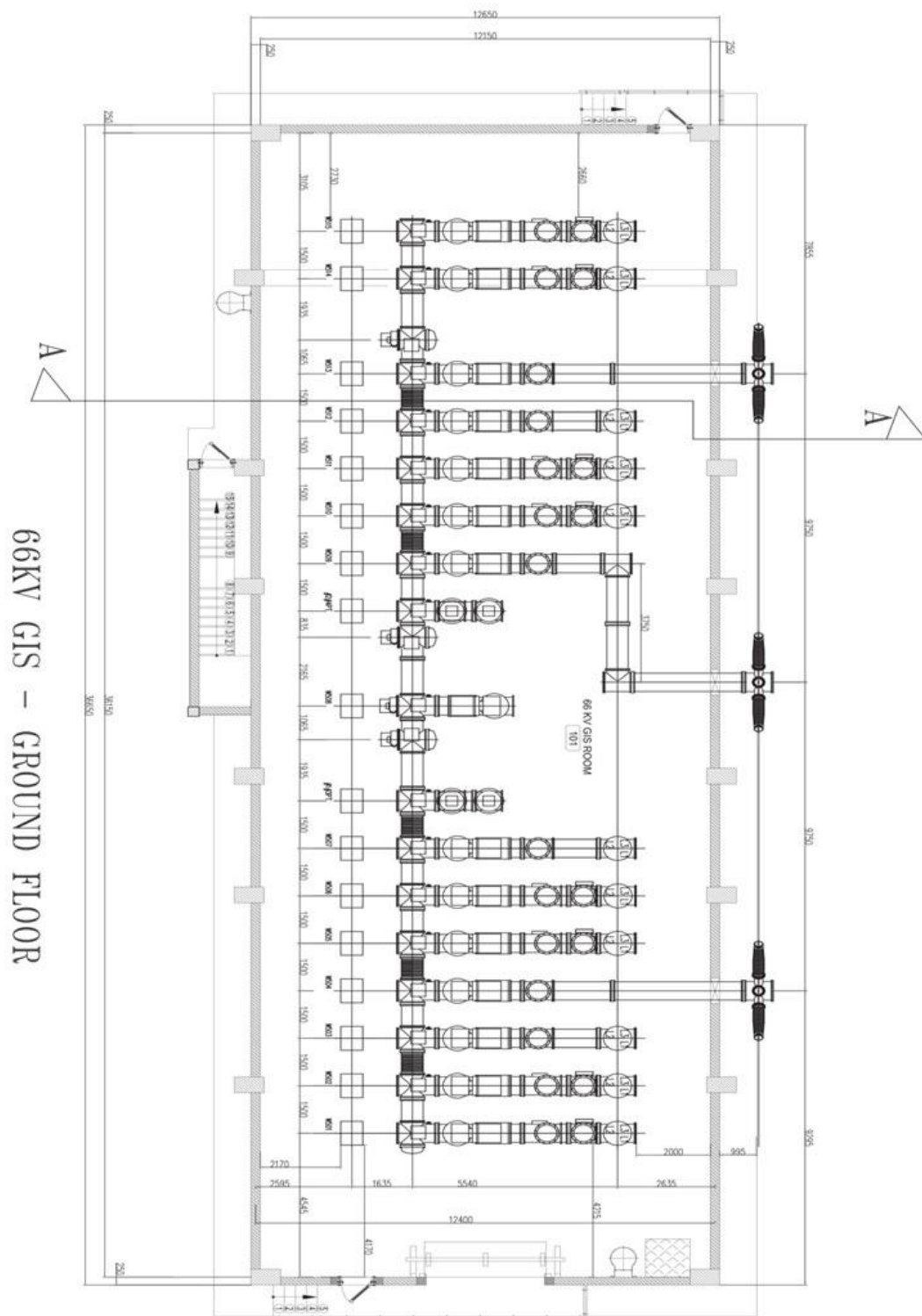


Figure 13-34 GIS Plan

13.11.2 الدخول إلى محطة GIS

يكون دخول وخروج المغذيات إلى المحطة

- إما من خلال خطوط هوائية (شكل 13-35) من خلال وحدة تسمى Outdoor Termination Module

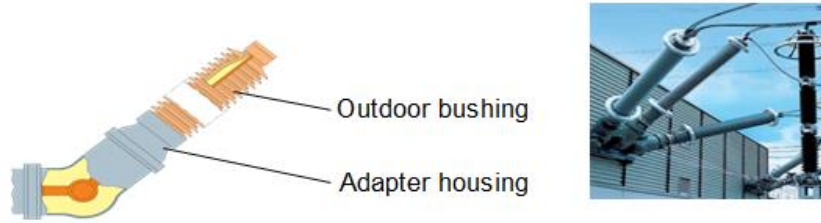


Figure 13-35 Outdoor Termination Module

- أو من خلال كابلات أرضية (شكل 13-37) من خلال وحدة تسمى Cable Termination Module

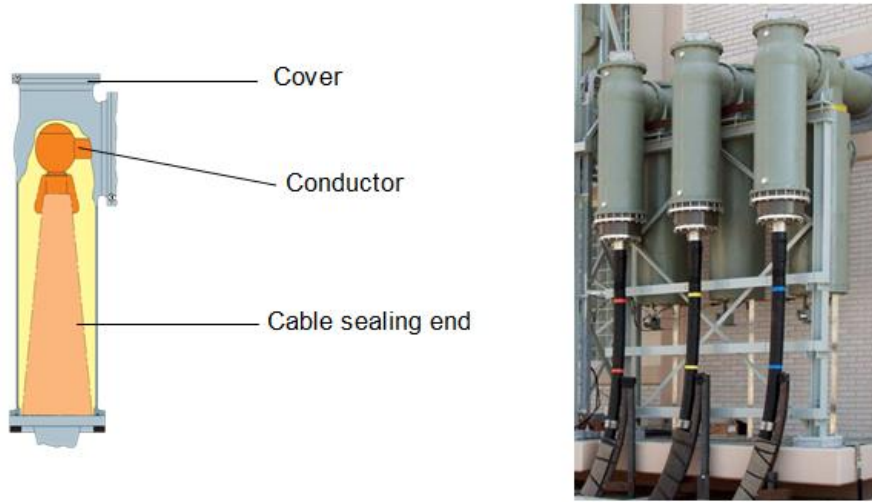


Figure 13-37 Cable Termination Module

- أما المحولات فتتصل بالنظام من خلال Transformer Termination Module كما في شكل

38-13

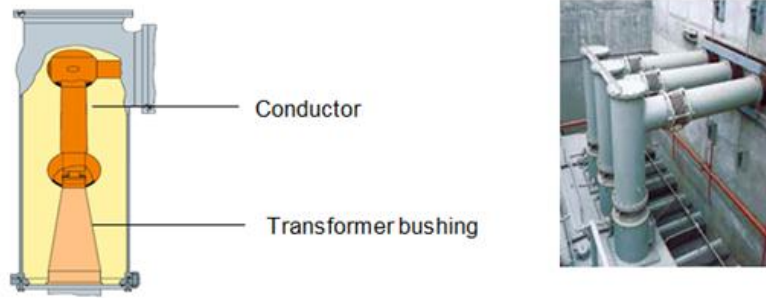


Figure 13-38 Transformer Termination Module

13.11.3 الحماية من الصواعق في محطات الـ GIS

يتم تثبيت عناصر أكسيد الزنك في مانعات الصواعق و التي تغمر في غاز الـ SF6 بواسطة اسطوانات عازلة بداخل مواسير الـ GIS. و لأن موصلات الـ GIS تتواجد بداخل وعاء معدني مؤرّض فإن المدخل الوحيد لنبضات الصواعق يكون من خلال اتصال الـ GIS بباقي النظام الكهربّي. فإذا كان التوصيل عن طريق الكابلات فلا مجال أن تتعرض المعدات للصواعق البرقية ، ولذا فإننا نهتم بأمر الصواعق فقط في حالة الـ SF6-to-Air Bushing. علما بأن مانعات الصواعق المعزولة بالهواء والتي تتركب بالتوازي مع الـ SF6-to-Air Bushing توفر حماية كافية للـ GIS من الصواعق ويسعر أقل من مانعات الصواعق المعزولة بالـ SF6.

القسم الثاني بالمحطة: المحولات

تعتبر المحولات هي العنصر الأساسي في المحطة فالغرض الأساسي من محطة التحويل هو رفع أو خفض الجهد بواسطة هذه المحولات . و تقع المحولات غالبا في فناء منفصل عن فناء منطقة الجهد العالي كما في الشكل 13-39- 39 و ليس هناك مهمات كثيرة في هذا الفناء لأن معظم المهمات الخاصة بالمحول تقع في منطقة الجهد العالي السابقة .



Figure 13-39 Transformers

(يفضل الرجوع لكتابى المرجع في محولات القوى الكهربائية) لمزيد من التفصيل في هذا العنصر الذى يمثل عصب المحطة).

القسم الثالث بالمحطة :

عنبر الجهد المتوسط MV Switchgear

بعد خروج كابلات الجهد المتوسط من المحولات فإنها تتجه إلى منطقة خلايا الجهد المتوسط حيث يتم ربطها على BB الجهد المتوسط من خلال قواطع CBs داخل خلايا كما في الشكل 13-40 . و تشمل كل خلية من هذه الخلايا بالإضافة إلى القاطع ومنطقة دخول الكابل على محول تيار/ جهد و سكينه عزل و أجهزة الحماية و القياس .

وهذا العنبر مكون من مجموعة من خلايا الجهد المتوسط (شكل 13-40) ، و عدد هذه الخلايا يساوى عدد كابلات الجهد المتوسط الخارجة من المحطة (خلايا الخروج) بالإضافة إلى عدد المحولات و التي تتصل بخلايا الدخول لهذا العنبر. ويضاف إلى ما سبق عدد آخر من الخلايا ، وهى خلايا القياس التي تحتوى على معدات قياس الجهد والتيار والقدرة بأنواعها ، وهناك خلايا لتوصيل مكثفات تحسين معامل القدرة ، وهذا كله بالإضافة بالطبع إلى خلايا الربط بين أجزاء اللوحة والخلايا الاحتياطية.

و كما ذكرنا فإن أحد أهداف محطات التحويل هو إعادة توزيع الطاقة الداخلة عليها من عدد محدود من المغذيات عالية الجهد والقدرة إلى عدد كبير من المغذيات منخفضة الجهد والقدرة ، لتعطى تغذية مساحة جغرافية أكبر وهذا الخلايا كلها متجمعة على الـ BB LV الخاص بالمحطة.

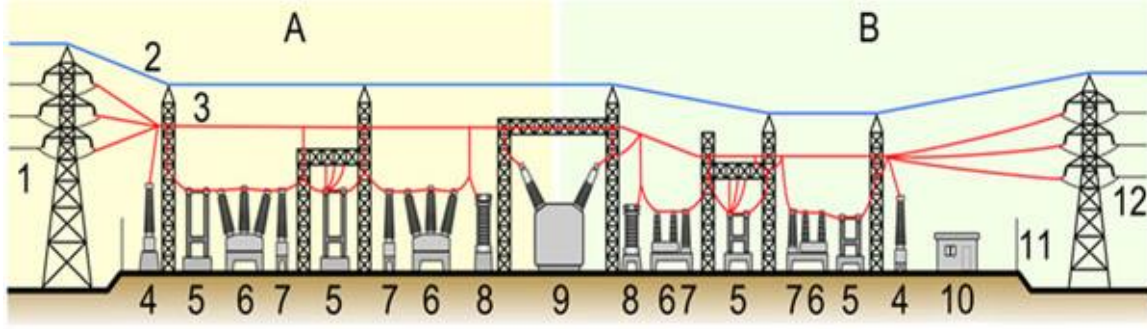


Figure 13-40 موزع جهد متوسط

تفاصيل أكثر عن هذه الخلايا تجدها في الباب الرابع (الفصل 19) في الجزء الخاص بموزعات الجهد المتوسط.

13.12 مقارنة المحطات الهوائية والغازية

المحطات الهوائية كما ذكرنا سابقا هي المحطات التي تستخدم الهواء كعازل بين الـ Phases المختلفة وكذلك أيضا بين الـ Phase والأرضي ، ويستخدم الحديد المجلفن في الإنشاءات لدعم المعدات والعوازل والخطوط الداخلة والخارجة للمحطة. والشكل 13-41 يجمع عناصر المحطة الهوائية في رسم توضيحي.



A: Primary power lines' side B: Secondary power lines' side
1. Primary power lines 2. Ground wire 3. Overhead lines 4. Transformer for measurement of electric voltage 5. Disconnect switch 6. Circuit breaker 7. Current transformer 8. Lightning arrester 9. Main transformer 10. Control building 11. Security fence 12. Secondary power lines

Figure 13-41 AIS

يوجد نوعان من المحطات الهوائية:

- 1- محطات خارجية **Outdoor**: و هي المحطات التي تكون مكشوفة في الهواء غير مغطاة.
- 2- محطات داخلية **Indoor**: تكون داخل مبنى مغطى و يستخدم هذا النوع من المحطات الهوائية في الأماكن شديدة التلوث و الأماكن الغير مستقرة مناخيا.



Figure 13-42 indoor AIS

وبالتالي فليس معنى أنها هوائية أنها مبنية في الهواء الطلق بل يمكن أن تبني داخل مبنى وتظل تسمى هوائية طالما أن العزل بين أجزائها هو الهواء كما في الصورة شكل 13-42.

كما أن المحطة قد تكون غازية لكنها في الهواء الطلق بدون مبنى كما في الصورة شكل 13-43

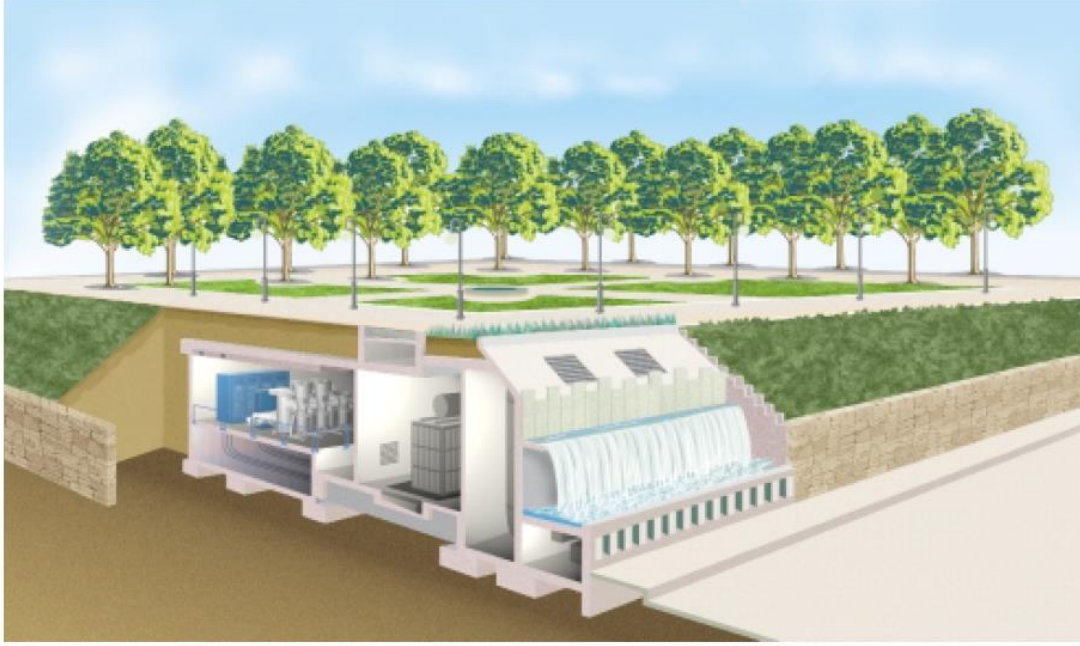


Figure 13-43 Outdoor GIS

أما محطات الـ GIS ، فمعلوم أن من أكبر التحديات الرئيسية اليوم في عالم نقل الطاقة الكهربائية هو تحقيق مستويات عالية من الجهد في شبكات النقل حتى لو كانت داخل المناطق الحضرية. وهذا يتطلب أن تشغل المعدات مساحات صغيرة ، ويتطلب ذلك أيضا انخفاض مستوى الضجيج والانبعاثات الكهرومغناطيسية.

والمحطات المعزولة بالغاز (GIS) لا مثيل لها عندما يتعلق الأمر بمساحة الإشغال والاعتمادية والكفاءة والسلامة. فتصميم محطة الـ GIS يكون أصغر بنسبة تصل إلى أكثر من 80% من إجمالي مساحة المحطات التقليدية كما أنها تكون أقل حاجة للصيانة . يعتبر هذا النظام من أفضل الأنظمة في الشبكة من حيث التشغيل والصيانة وهو موجود بالمحطات ذات السعات العالية وكذلك أكثر محطات التوليد.

بل إن محطات الـ GIS يمكن إنشاؤها تحت الأرض كما في المحطة التي أنشأتها ABB في أسبانيا وتظهر في الشكل التالي . والجميل أنه تم إنشاء حديقة عامة فوق المحطة ، والأجمل من ذلك تلك الفكرة العبقرية بأن أضافوا شلالات مائية في المحطة والتي يبدو أنها لتجميل الحديقة والصحيح أن الغرض من هذه الشلالات الصناعية هو المساهمة في عمليات التبريد بالمحطة ، كما أن صوت الماء في هذه الشلالات يغطي على صوت المراوح الموجودة أسفل الحديقة!!.



Use of ABB gas-insulated switchgear allowed the 132-kV transformer substation Barbaña in the center of Orense, Spain, to be constructed underground and a park built over it which harmonizes with the surroundings. The sound of the waterfall, which acts as a heat-exchanger, hides the noise made by the fans.

1

13.12.1 مميزات المحطات الهوائية:

- أعمال البناء المطلوبة لهذا النوع أقل نسبيا من محطات GIS وتكلفة تركيب الـ switchgear أقل.
- عمل توسعات في هذا النوع من المحطات أسهل.
- الوقت اللازم لبناء المحطة أقل.
- جميع المعدات يمكن رؤيتها وبالتالي فإكتشاف الأعطال يكون أسهل.

13.12.2 عيوب المحطة الهوائية :

- تبنى على مساحات واسعة مقارنة بمحطات الـ (GIS). فمن المعروف أن أقصى جهد يتحمله الهواء هو 30 kV/cm في الضغط الجوى العادى ، وإذا زاد الجهد عن هذه القيمة فإن عزل الهواء ينهار و يصبح موصلا. وبالتالي فإن المحطات الهوائية تحتاج إلى مساحات كبيرة حتى يمكن توفير قيمة العزل المطلوبة.
- ونتيجة للنقطة السابقة فإن بناء محطة هوائية أصبح معقدا في التخطيط و يتطلب الكثير من الوقت في التنفيذ مما يزيد من التكلفة الثابتة ، كما أن احتياجها للصيانة الدورية يجعل تكلفة التشغيل أيضا مرتفعة.

- محطات الـ AIS تعتبر أقل في الاعتمادية من محطات GIS بسبب أنها معرضة أكثر للصواعق ، وبسبب أن الهواء ردي كعازل ، فتغير درجة حرارة الهواء و مستوى الرطوبة و المطر وملوثات الهواء عوامل رئيسية تتسبب في انهيار العزل عند جهد أقل من الجهد الذي تمت عليه الحسابات .

13.12.3 مميزات محطات الـ GIS:

- هذه المحطات آمنة ويتم عزل الأجزاء المكهربة باستخدام أغلفة معدنية مؤرسة ومن ثم فهناك ثقة في عزل كل الأجزاء التي يمر بها تيار كهربى .
- والمحطات المعزولة بهذا الغاز تزيل المجال الكهربى بالكامل لأن الأغلفة المعدنية بهذه المحطات تمنع ظهور المجال الكهربى خارجها ، وهذه فائدة حقيقية للقائمين بأعمال التركيبات Installers وموظفي التشغيل و الصيانة ، ومن يعيشون على مقربة من تلك المحطات.
- تكلفة التشغيل قليلة.
- معدلات ووقت الصيانة أقل ، فهي تتطلب صيانة كل أربع سنوات بينما AIS تتطلب صيانة كل سنة أو سنتين ، كما أن مدة الصيانة نفسها في محطات الـ AIS تكون أكبر ، فصيانة الـ AIS breaker وحده تأخذ حوالي 4-8 ساعات في كل مرة (للقاطع فقط).
- المحطة غير مقيدة بالموقع فمن الممكن أن تبنى المحطات فى الأماكن المفتوحة أو المغلقة فوق أو تحت الأرض بجانب البحار و المحيطات أو فوق المرتفعات أو فى مناطق الجليد أو الممطرة. أي أن استخدام هذا النوع من المحطات لا يتأثر بالظروف المناخية أو الموقع نظرا لأنها محكمة الغلق ولا يتأثر العزل بمثل هذه الظروف.
- سهولة التركيب (تستغرق وقتا أقل بنسبة 30 % من المحطات الهوائية).
- التوفير فى مساحة المحطة ، فمثلا عند جهد 400 كيلو فولت تكون مساحة محطة الـ AIS تقريبا تساوى $199 \times 236 = 46765 \text{ م}^2$ ، أما فى محطات الـ (GIS) فتكون المساحة تقريبا تساوى $12 \times 43 = 522 \text{ م}^2$ فقط.

○ والفرق بين النوعين من حيث المساحة المطلوبة للمحطة واضح من خلال الشكل 13-44:

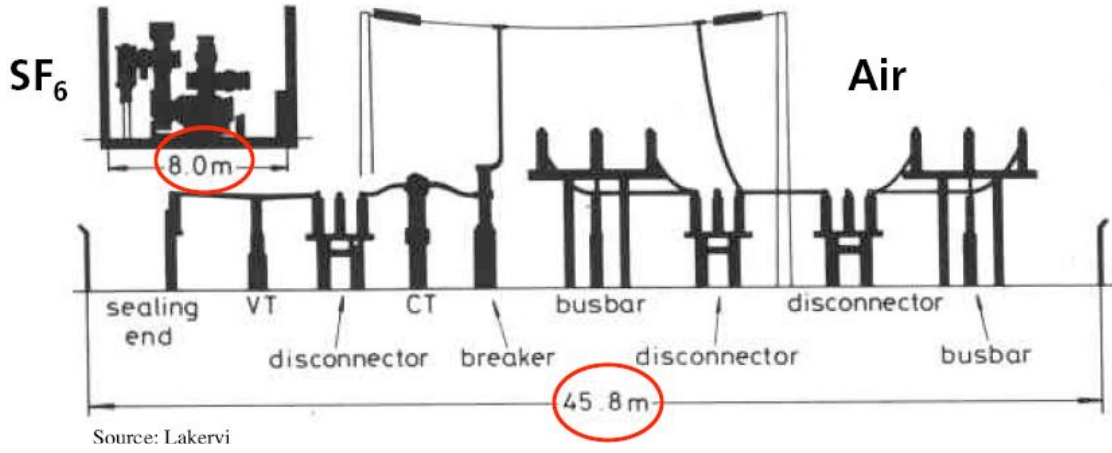


Figure 13-44 AIS vs GIS

13.12.4 عيوب محطات الـ (GIS):

- التكلفة العالية مقارنة بالمحطات التقليدية
- في حالات حدوث الخلل تكون الأضرار على نطاق واسع
- تحديد الخلل و اكتشافه و تصليحه يستغرق وقتا كبيرا .
- ضغط الغاز يجب أن يكون مراقبا في جميع مكونات المحطة فأي انخفاض في ضغط الغاز قد يؤدي إلى حدوث خلل قد يكون مدمرا
- غاز SF6 يسبب تآكل الأوزون و يساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري

13.12.5 مقارنة بين اقتصاديات المحطات

تكلفة المعدات في محطات الـ GIS أعلى من نظيراتها في المحطات التقليدية التي تستخدم عزل الهواء كما ذكرنا. و ترجع هذه الزيادة في التكاليف إلى عدة عوامل لعل أبرزها وجود إطار معدني. و مع ذلك فإن محطات العزل بالغاز هي أقل في التكلفة من حيث التركيب. كما تمتلك محطات الغاز ميزة هامة تتمثل في انخفاض تكلفة تنمية أو تأهيل الموقع. و هذه الميزة تزداد أهميتها كلما ازداد جهد المحطة لأنه في المحطات التقليدية يكون كلمة "جهد أعلى" تعني "مساحة أكبر" و بالتالي تكاليف أكثر لتأهيل هذه المساحة.

عند الجهود العالية كان متوقعا من محطات الـ GIS أن تكون أقل كلفة من التقليدية ، ولكن ما حدث أنه قد تم خفض تكلفة محطات الهواء بصورة كبيرة عن طريق التقدم التقني و الصناعي (و خصوصا في القواطع) و ذلك

خلال الثلاثين سنة الماضية ، بينما لم تظهر أسعار مكونات الـ GIS أى انخفاض كبير خلال هذه الفترة ، وكانت تكلفة محطات الـ GIS أعلى من تكلفة الـ AIS بحوالي 10 % إلى 40 % .

غير أن الوضع قد بدأ بالتغير نسبيا فى وقتنا الحالى ، فإننا نشهد تناقصا فى كلفة الـ GIS نتيجة للتكامل بين أجزاء المحطات. كما أن ظهور نظم التحكم الرقمى و تزايد استخدامها فى محطات النقل أدى إلى طفرة ملحوظة فى محولات الجهد والتيار خفضت كثيرا من كلفتها. علاوة على أن تكلفة التركيب و تأهيل الموقع تنخفض تدريجيا فى محطات الـ GIS.

و حاليا هناك توجه جديد يسمى "تقنيات السويتش المختلطة" أو "محطات عزل الغاز الهجينة" و التى تستخدم قواطع و مفاتيح و محولات تيار و جهد معزولة بغاز الـ SF6 موصولة بباقي المعدات فى المحطة عن طريق موصلات معزولة بالهواء. هذا التطور الحديث ينبئ بحدوث طفرة فى أسعار الـ GIS مع التضحية باستخدام مساحات أكبر للمحطة.

14

ترتيبات قضبان التوزيع

BUS BARS ARRANGEMENTS

دور الـ BB في المحطات أنه يسهل عملية توزيع الطاقة بين دوائر الدخول والخروج ، وهو عنصر هام وخطير بالمحطة لأن أى عطل عليه قد يتسبب فى خروج المحطة بالكامل. فوظيفة الـ BB هي تجميع الطاقة الكهربائية القادمة من دوائر الدخول (المصدر) ثم توزيعها على دوائر الخروج (الأحمال والمحولات والخطوط الخارجة من المحطة) .

14.1 تصنيع القضبان العمومية

يوجد أسلوبان أساسيان مستخدمان في تصنيع القضبان هما:

- 1- القضبان الصلبة Rigid bus .
- 2- القضبان المرنة Strain bus .

وفى الغالب تستخدم القضبان الصلبة rigid في حالة الجهد الكهربى المتوسط والمنخفض ، وتكون مصنوعة من الألومنيوم أو النحاس على هيئة قضبان أو أنابيب تربط بين أجزاء المحطة المختلفة كما فى الشكل 14-1.



Figure 14-1 Rigid Bus Bar

أما في حالة الجهد العالي فتستخدم القضبان المرنة strain المصنوعة من أسلاك الألومنيوم المجذولة والمدعمة ACSR ، أو من النحاس ويتم تثبيتها على عوازل Strain type insulators وذلك للربط بين مكونات المحطة كما في الصورة شكل 14-2.



Figure 14-2 Strain Bus bar

ويوجه عام يستخدم الألومنيوم والنحاس وسبائك الألومنيوم المعالجة حرارياً وخاصة في حالة الأنابيب hollow tube bus bars التي تستخدم في الجهد العالي أو الفائق . ويتميز الألومنيوم عن النحاس بأنه أقل في الوزن كذلك يحتاج لصيانة أقل ، وإن كان النحاس أعلى فإنه يتميز أيضاً بأن مقطع موصل الألومنيوم يكون أكبر بحوالي 33% من مقطع موصل النحاس لنفس قيمة التيار .

وأحيانا تكون الـ BB معزولة بغاز الـ SF6 داخل مواسير كما في الشكل 14-3.



Figure 14.3

SF6 gas insulating bus-duct (GIB)

14.1.1 مميزات وعيوب البس (Rigid Bus) :

أهم الميزات:

- 3- أقل استخداما للحديد وأسهل في التصميم المدني.
- 4- أسهل في تنظيف العوازل .
- 5- أقل ارتفاعا ويمكن فصله للصيانة.
- 6- أفضل من حيث رؤية الأجهزة و المعدات.

أما أهم العيوب فهي:

- استخدام العديد من العوازل والدعامات وبالتالي الحاجة إلى صيانة هذه العوازل وتنظيفها .
- يتطلب مساحة أكبر مقارنة بالـ **Strain bus**
- أعلى تكلفة مقارنة بـ **(strain bus)**.

وتتوقف قيمة المسافات بين القضبان حسب جهد التشغيل كما في الجدول 1-14

Table 14-1

الجهد	مسافة بين الفاز وارضى بملى ميتر	مسافة بين الفاز والفاز بملى ميتر
6.6	139.7	177.8
11	177.8	228.6
22	279.4	330.2
33	381	431.8
66	685.8	787.4
110	863.6	990.6
132	1066.8	1219.2
220	1778	2057.4

14.2 ترتيبات الـ BB ARRANGEMENTS

يمكن تقسيم الـ BBs من حيث التركيب إلى عدة أنظمة:

- 1-Single BB
- 2-Double BB
- 3-Ring System

وكل نظام منهم يندرج تحته عدة أنظمة فرعية:

ويوجد داخل كل Substation نوعان من الـ BBs : أحدهما جهة الجهد العالي ، والآخر جهة الجهد المتوسط. والهدف من الـ BB الخاص بالجهد العالي كما ذكرنا هو ربط دوائر الدخول/ الخروج من/ إلى الشبكة العامة من جهة ، وربطها مع محولات القدرة من جهة أخرى ، بحيث يمكن للمحطة أن تستقبل قدرة أو تنقل قدرة من / إلى الشبكة.

أما الـ BB الخاص بالجهد المتوسط فوظيفته ربط الكابلات الخارجة من محولات القدرة الرئيسية بالمحطة بمجموعة كابلات الجهد المتوسط المتجهة خارج المحطة لتغذية أحمال المستهلكين .

والسبب في تنوع أشكال الـ BB هو المزيد من تسهيل عملية اختيار النوع المناسب للمحطة من حيث التشغيل والتكلفة.

ويتم التمييز بين الأنواع المختلفة حسب حجم توافر الميزات التالية في نظام الـ BB :

- (1) بساطة النظام.
- (2) سهولة الصيانة للمعدات المختلفة.
- (3) التقليل من مدد انقطاع الخدمة.
- (4) توفر إمكانية التوسع مع نمو الطلب.

(5) توفر إمكانية إضافة دوائر جديدة للمحطة دون الحاجة لفصل الدوائر الموجودة بالخدمة أثناء عملية التركيب.

وبالطبع هذه الميزات جميعا قد يتوافر بعضها أو كلها فى نظام ولا يتوافر فى الآخر ، وطبعى أيضا أن التكلفة تزيد بزيادة الميزات ، ومن هنا ستكون هناك موائمة ما ، عند تصميم أى محطة للوصول لأفضل الاختيارات .

14.3 النظام الأول : SINGLE BUS BAR :

يستخدم في المحطات ذات القدرات المنخفضة والجهود المتوسطة ويوجد منه نوعان :

14.3.1 محطات تحويل أحادية القضبان

وهذا النوع هو أبسط أنواع الـ BB وأرخصها ، ويندر أن تجده في محطة تحويل مهمة ، ولكن قد تجده في محطات التحويل الصغيرة داخل شبكات التوزيع كما في الشكل 14-4.

4. وبالطبع يعيبه أنه في حالة حدوث عطل بدائرة الدخول أو على أى جزء بين الـ BB فستخرج كل الدوائر المتصلة على هذا الـ BB.

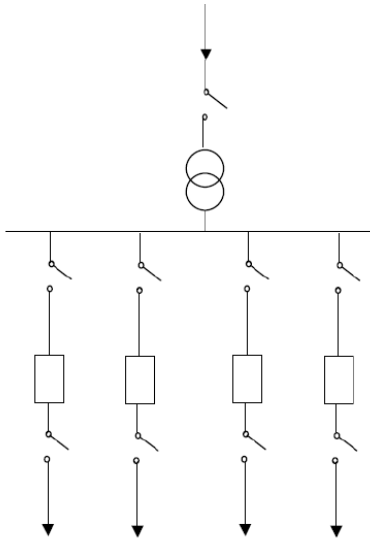


Figure 14-4 Single BB

وأيضاً إذا أردت أن تضيف دائرة خروج جديدة على هذا الـ BB أو حتى عمل صيانة في خلية قديمة موجودة فيلزم أولاً أن تفصل وتعزل الـ BB كله حتى تنتهي من عمل التركيبات الجديدة .

14.3.2 محطات تحويل أحادية القضبان مع فاصل القضبان

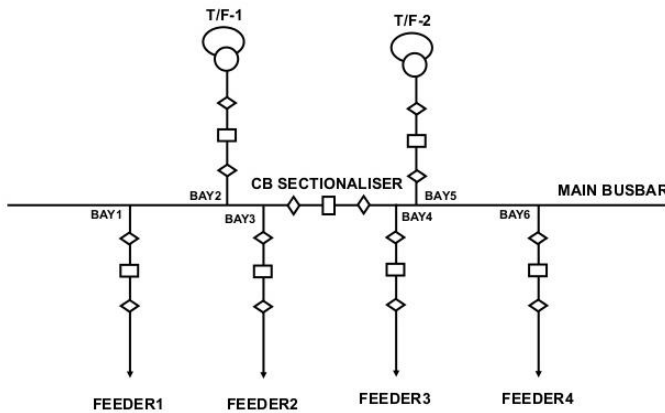


Figure 14-5 Sectionalized single BB

لتقليل المشاكل السابقة يمكن استخدام sectionalized Single BB كما في الشكل 14-5 ، وهذا النوع له اعتمادية أعلى حيث أن كل جزء يتصل بمغذى مستقل ، فعند حدوث عطل على جزء ما فإننا نفقد فقط نصف أو ثلث الأحمال (حسب عدد الـ Sections) وليس كل الأحمال كما في النوع الأول .

والصورة التالية شكل 14-6 تمثل نموذجاً لـ Single BB with 3-Sections في محطة جهد 132 ك ف.



Figure 14-6 Sectionalized single BB

كما يمكن تغذية الجزئين من مغذى واحد في حالة حدوث عطل في أحد المغذيين بشرط أن يتحمل المغذى الرئيسى لهذا الجزء الحمل بالكامل ، فإذا كان لا يمكنه أن يتحمل كل الحمل فيمكن أيضا توصيل الجزئين ولكن مع فصل بعض الأحمال غير المهمة حتى يصبح المغذى قادرا على تحمل بقية الأحمال. وبالطبع فهذا النوع والنوع الذى سبقه أيضا لا تجدهما في حالة المحطات المهمة.

ويعيب هذا النظام كما هو الحال بالنسبة لنظام single bus system ، أن صيانة المعدات (الـ CB مثلا) في أي Bay لا يمكن أن تتم من دون انقطاع التغذية أو المحولات المتصلة بهذا الـ Bay.

14.4 النظام الثاني: نظام القضبان المزدوجة Double Bus Bar :

يستخدم هذا النظام في المحطات ذات القدرات العالية وأنظمة الجهد العالي ، وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربائية بطريقة تضمن استمرارية أفضل للتغذية .

ويوجد منه عدة أنواع :

Double BB with Single CB – 1

Double BB with Double CB – 2

Double BB with One and Half CB – 3

Double BB (Main and Transfer) – 4

ولكل شكل منهم ميزاته وعيوبه ، لكن الميزة المشتركة فيهم جميعا هي أنه إذا حدث عطل على أي من الـ Two-BBs أو إذا تم فصل أحدهما لإضافة أو عزل دائرة جديدة فلن يتسبب ذلك في أى مشكلة بسبب وجود الـ BB الثاني الذى يمكن نقل جميع الدوائر إليه باستخدام رابط القضبان Bus Coupler, BC كما سنرى. لكن عند حدوث مشكلة على دوائر الدخول أو دوائر الخروج سيكون هناك فرق بين الأنواع الأربعة في درجة الاعتمادية كما سنرى.

14.4.1 النوع الأول من القضبان المزدوجة Double BB with Single CB :

في هذا النوع (شكل 14-7) وعند الحاجة مثلا لإضافة دائرة جديدة على M-1 يمكن نقل كافة دوائر الدخول والخروج إلى M-2 بالخطوات التالية :

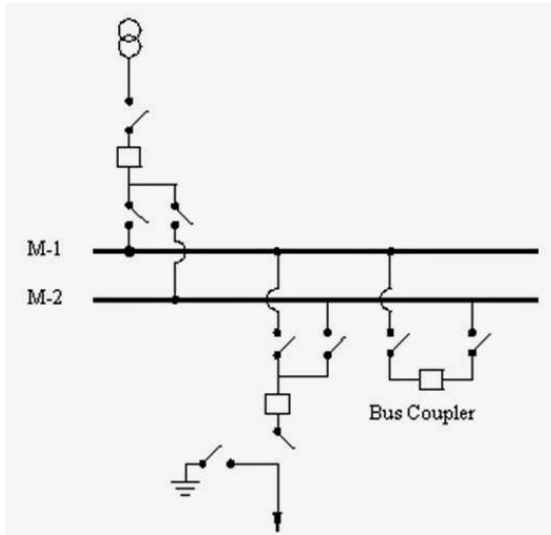


Figure 14-7 Double BB with Single CB

- غلق سكاكين الـ Bus Coupler, BC
- غلق الـ CB الخاص بالـ BC (الآن أصبح الـ BBs-2 لهما نفس الجهد)
- غلق سكاكين الدوائر الموصلة على M-2 (لاحظ أن فرق الجهد على هذه السكاكين يساوى صفرا ومن ثم يمكن فتحها وغلقها بأمان)
- فتح سكاكين الدوائر على M-1
- فتح الـ CB الخاص بالـ BC
- فتح سكاكين الـ BC

الآن أصبحت جميع دوائر الدخول والخروج موصلة على الـ BB الثاني ويصبح الأول جاهزا لأي صيانة أو إضافة تركيبات دون التأثير على الخدمة.

ويعيب هذا النوع عدم إمكانية عمل صيانة على الـ CB الخاص بدائرة خروج دون فصل الأحمال على هذه الدائرة وتأثيرها ، والوضع سيكون أسوأ إذا كانت الصيانة على الـ CB الخاص بدائرة الدخول إذا كانت هناك دائرة واحدة أو كانت الدائرة الأخرى لا تتحمل كافة الأحمال ، بمعنى أنه مفيد فقط في صيانة الـ BB أو عند إضافة أحمال . ويعيبه أيضا استخدام ثلاث سكاكين فصل (Isolators) لكل دائرة فضلا عن استخدام قاطع إضافي وهو الخاص بالـ Bus Coupler.

لاحظ الفرق بين الـ Bus Section في النظام الأول والـ Bus Coupler في النظام الثاني:

✚ فالأول يسمى مجزئ القضبان Bus Section ، وهو عبارة عن قاطع يقوم بتجزئة الـ BB إلى جزأين مما يعطي مرونة في استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء أعمال الصيانة على أحد الأجزاء كما رأينا .

✚ أما الثاني فيسمى دامج القضبان Bus Coupler هو أيضا قاطع لكنه يقوم بعملية ربط أكثر من BB مع بعض لكي يضمن استمرارية التغذية للأحمال أثناء حدوث الأعطال أو إجراء الصيانة على أحد القضبان أو لسهولة التوزيع للأحمال.

14.4.2 النوع الثاني Double BB with Double CB

في هذه التوصيلة (شكل 14-8) تكون دائما جميع الـ CBS مغلقة في الظروف الطبيعية. وبالإضافة للمميزات التي ذكرت في النوع السابق فلدينا هنا ميزة إضافية وهي أنه في حالة حدوث مشكلة في الـ CB المتصل بالـ BB الأول الخاص بالدائرة سواء (الدخول أو الخروج) فيمكن هنا مباشرة استخدام الـ CB الثاني ، وهذه ميزة هامة على اعتبار أن مشاكل الـ CB متكررة.

وهذا بالطبع مكلف جدا ويندر أن تجده في محطات التحويل العادية (ولكنه يستخدم في محطات التوليد ومحطات التحويل ذات الجهد العالي والفائق نظرا لأهمية هذه المحطات) ويعيب هذا النوع بالإضافة إلى التكلفة والمساحة الكبيرتين أنه يحتاج لفصل 2-CBs لكل عطل وهذا يضاعف احتمالية حدوث Breaker Failure .

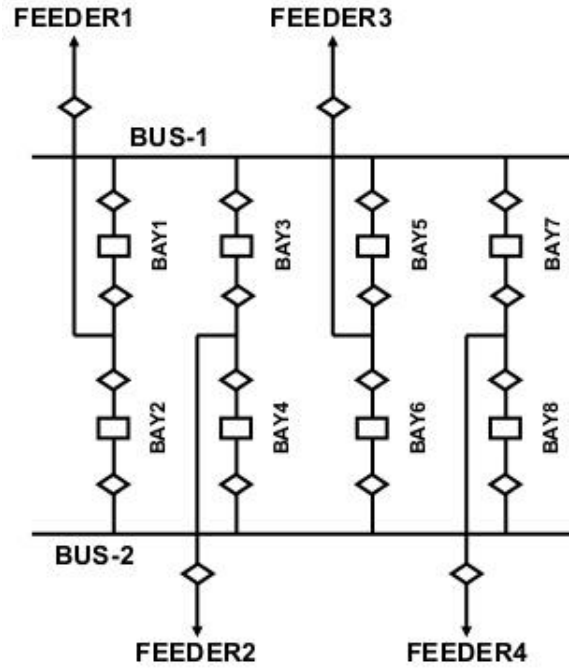


Figure 14-8 Double BB with Double CB

14.4.3 النوع الثالث: Double BB with One and Half CB

هو حل وسط بين النظامين السابقين (شكل 14-9) فلدينا هنا في الشكل 2-BB وبينهما تركيب ثلاثة قواطع لكل دائرتين أي لدينا قاطع و نصف لكل دائرة و هذا يعني نوعا من التوفير في عدد القواطع. لكن نظام الوقاية سيكون نسبيا أكثر تعقيدا من الأنظمة السابقة . ولأهمية هذا النظام وكثرة وجوده بالمحطات سيتم شرحه هنا بصورة مفصلة.

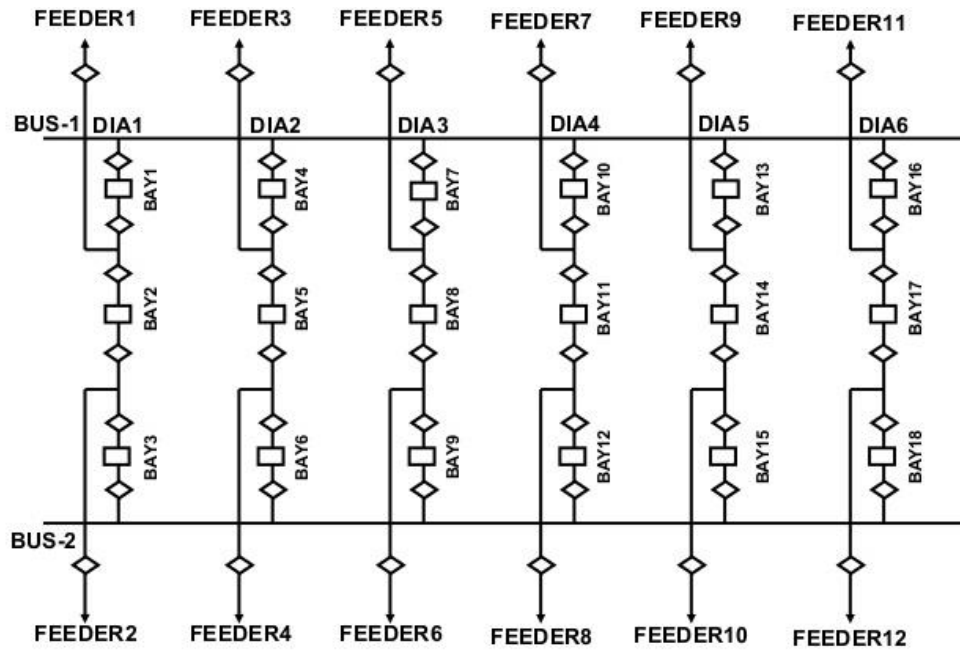


Figure 14-9 One and Half BB

الأصل أن الـ 3-CBs الموجودة على كل دائرتين كلهم مغلقين في الظروف الطبيعية (تسمى المجموعة الواحدة Bay كما في الشكل 14-9) ، وبالتالي فالـ BBs الاثنان يعملان أيضا في الظروف الطبيعية ، ولذا يعتبر كل واحد منهما Main-BB ، ولا فرق بينهما ويسمى الـ CB الموجود في الوسط بالـ Tie-Breaker .

وعند حدوث عطل على أى خط فإن كلا الـ CBs المتصلان بالخط المعطل يفصلان (يمين و شمال الدائرة) وبالتالي تعزل الدائرة المعطلة تماما دون تأثير على أى دائرة من الدوائر الأخرى بالمحطة ، فمثلا لو كان هناك عطل على Feeder-8 في الشكل السابق فسيتم عزله بفتح الـ CBs الموجودة في Bay11 and Bay12 .

ولو كان هناك عطل على الخط T1 في الشكل 14-10 فسيتم عزله بفتح CBA 1 and CBA 2 ، مع ملاحظة أن بقية الخطوط لا تتأثر بفتح هذين القاطعين ، فالخط T3 سيتم تغذية من المصدر S من خلال CBA 5 بينما الخط T2 سيتم تغذيته من المصدر S عبر القواطع 5 ثم 6 ثم 3 كما في الشكل 14-10.

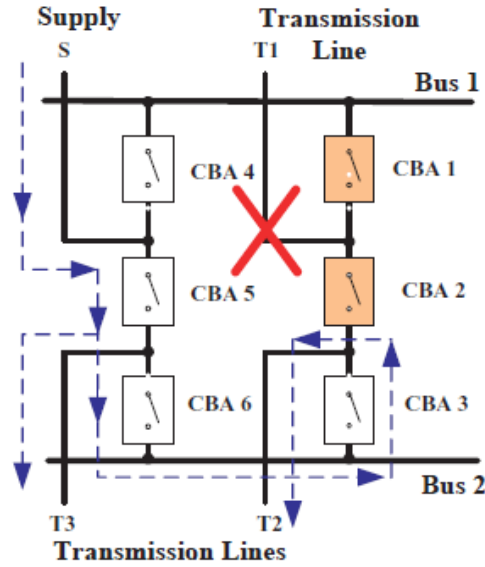


Figure 14-10

لاحظ أيضا أنه يمكن صيانة أى واحد من الـ CBs الثلاثة الموجودة فى أى Bay بالمحطة بدون فصل أى من الأحمال ، كما فى المثال الموضح بالشكل 14-11 حيث افترضنا خروج CBA 5 ، ومع ذلك فمزال المصدر S قادرا على تغذية الخطوط الثلاثة .

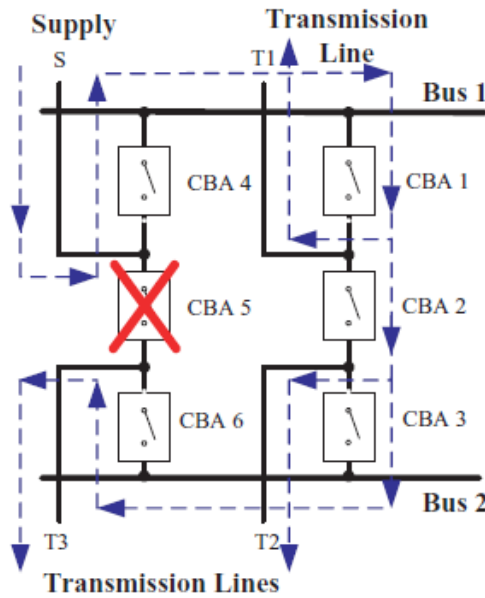


Figure 14-11

فالخط رقم T1 يمكن تغذيته من خلال القاطع 4 ثم القاطع 1 ، بينما الخط T2 يمكن تغذيته من خلال القاطع رقم 4 ثم 1 ثم 2 .

وأخيرا فالخط رقم T3 يمكن تغذيته من خلال رقم 4 ثم 1 ثم 2 ثم 3 ثم 6 ومنه للخط. وهذا يعنى أن النظام لم يتأثر بخروج القاطع CBA 5.

لكن هذا يستلزم أن تكون مواصفات القاطع رقم 4 مثلا ملائمة لكي يتحمل تيار كل المغذيات .

يمكن أيضا في هذا النظام فصل أي من الـ Two-BBs دون فصل أي دائرة ، كما في المثال الموضح بالشكل 12-14، فرغم فتح الـ Bus 1 إلا أن الخطوط الثلاثة لاتزال مغاظة بالمسارات الموضحة بالشكل. وبالطبع يمكن بعد عزل الـ BB أن نضيف عليه أي دوائر جديدة ، وهذا يعنى أن النظام يتميز بالقدرة على إضافة أي دوائر جديدة (سواء كانت دوائر خروج أو دخول) دون تأثير على بقية الدوائر الموجودة بالخدمة وهذا يساعد على إستقرار الشبكة وتحقيق استمرارية التشغيل .

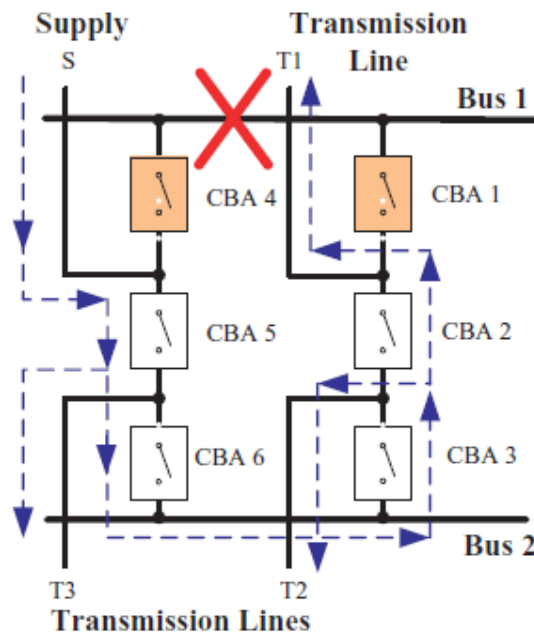


Figure 14-12

والشكل 13-14 يمثل نموذجا لنظام الـ BB في محطة شبرا الخيمة حيث أربع دوائر دخول وثمانية دوائر خروج.

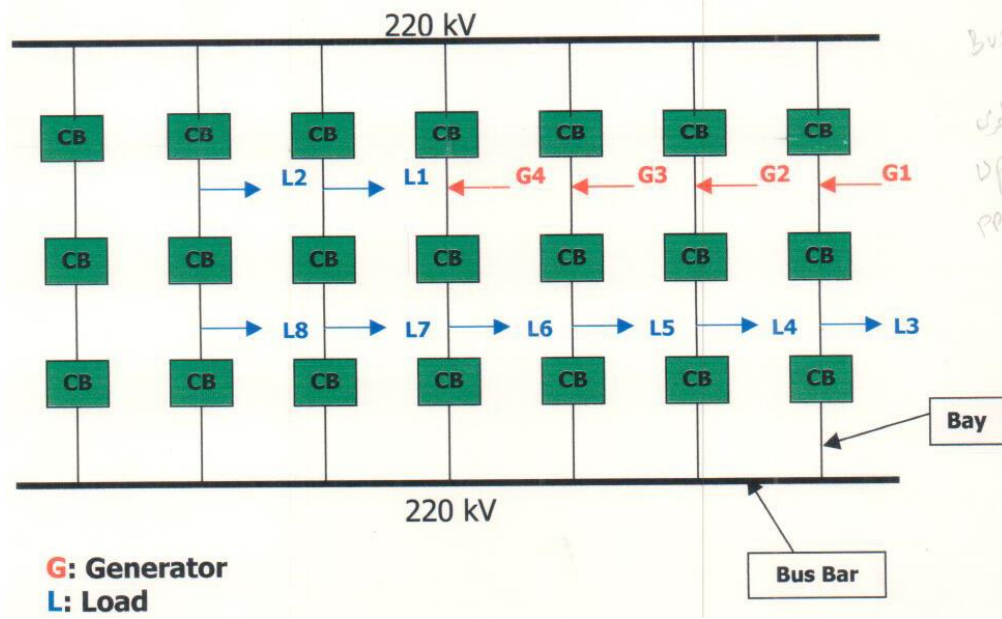


Figure 14-13 Seven Bays in a generation station

14.4.4 النوع الرابع Main and Transfer

هذا نوع آخر من التركيبات التي بها 2-BBs ، والأصل هنا (شكل 14-14) أن تدخل جميع الدوائر الدخول و الخروج على الـ BB (Main) ، فإذا أردنا عمل صيانة لـ CB الخاص بأى دائرة فى الشكل فإننا نقوم بغلق دائرة الـ Bus Coupler أولاً وذلك بإغلاق السكاكين على كلا جانبي قاطع (Bus Tie) bus coupler ثم إغلاق القاطع نفسه وذلك من أجل أن يصبح الجهد على كلا الـ BBs متساويا ، ثم نقوم بغلق السكينة الثالثة المتصلة بالـ Transfer Bus للدائرة المراد صيانتها ثم نقوم بعزل الـ CB الخاص بالدائرة ومن ثم فتح السكاكين الخاصة به.

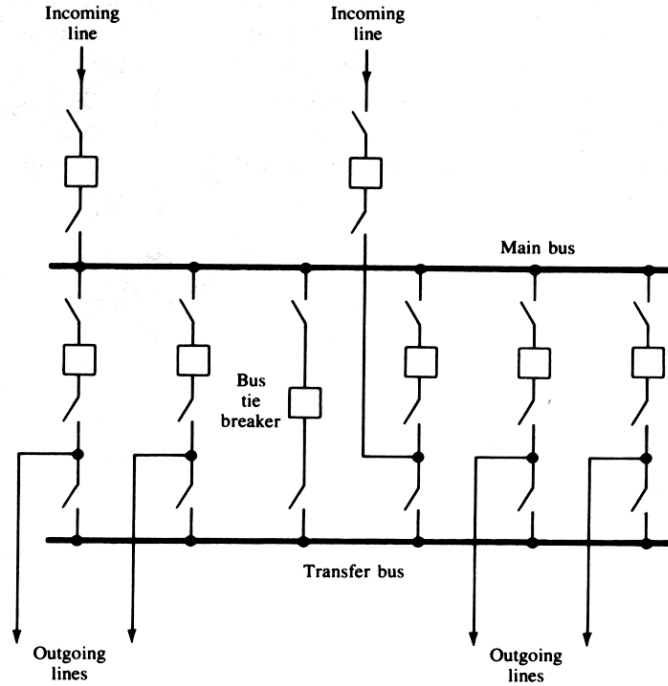


Figure 14-14-14 Main and Transfer BB

و يصبح الآن الخط متصلاً بالـ Transfer Bus من خلال السكينة العلوية و في هذه الحالة يكون الـ CB الخاص بالـ BC هو نفسه المختص بحمايته أثناء عملية الصيانة وفي هذه الحالة يصبح النظام مشابهاً تماماً لنظام Double BB with Single CB الذي ذكر في النوع الأول.

في هذا النوع أيضاً يمكن إجراء صيانة الـ (Line Circuit Breaker) دون حدوث تأثير على الـ (Supply) وبهذا يتميز عن (Double Bus-Bar with Single Breaker).

كما يتميز بإمكانية نقل الأحمال من الـ (Main Bus) إلى الـ (Transfer Bus) في حالة حدوث عطل أو إجراء صيانة للـ (Main Bus) ، ولكن يعيب هذه التوصيلة أنه في حالة خروج Main BB للصيانة فإن بقية الدوائر يمكن نقلها إلى الـ BB الأخرى لكن بدون وقاية بمعنى أنه لا يوجد CB على الدائرة وإنما فقط Disconnecting Switch .

لاحظ أن كلا النظامين (Main and Transfer & Double BB with Single CB) كلاهما يصنف في الظروف الطبيعية على أنه single BB لأن الـ Bus Coupler, BC يكون دائماً مفتوحاً و هذا يجعل الاعتمادية في كلا النظامين تشبه الاعتمادية في نظام الـ Single-BB .

14.5 النظام الثالث : Ring System أو Mesh-System

هذه التوصيلة تتميز باعتمادية عالية كما في الشكل 14-15 ، ويتكون من عدة مفاتيح كهربية مربوطة مع بعضها البعض على التوالي ، و تربط عدة دوائر كهربية وذلك من أجل الاستفادة من توزيع ونقل الأحمال الكهربائية في حالات الصيانة على الدوائر الكهربائية في المحطة وبالتالي استمرارية التغذية للأحمال الكهربائية. وفي هذا النظام يكون عدد الـ (Circuits) مساويا لعدد القواطع (Circuit Breakers) الموجودة في الشبكة. ولا يعتمد على وجود (Main Bus-Bar).

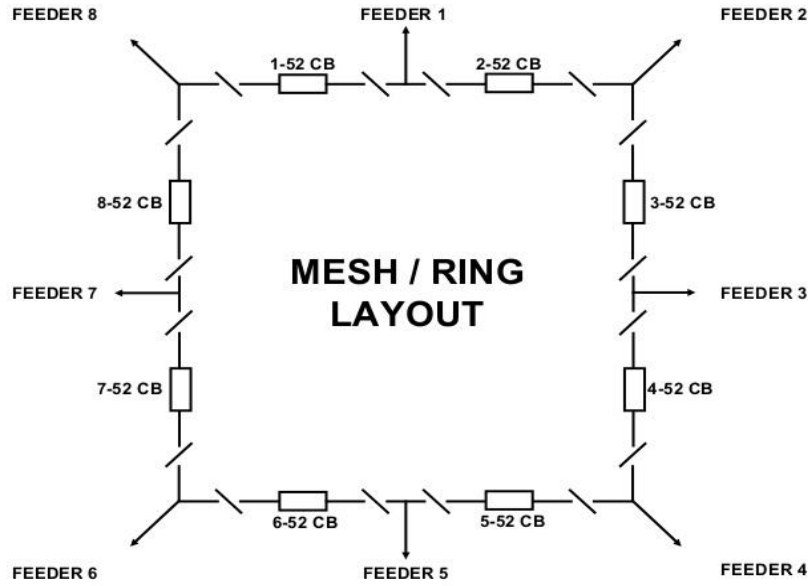


Figure 14-15 Ring System

ويمكن هنا عمل صيانة لأي CB بتحويل اتجاه Power flow إلى الجهة الأخرى دون الحاجة لفصل الدائرة ، و تكلفته تقترب من تكلفة نظام الـ One and Half ، لكن الفرق أن الأخير يفضل استخدامه إذا كان عدد الدوائر كبيرا ، لأن وضعها عندئذ في Mesh System سيكون معقدا من عدة نواحي منها تنسيق الوقاية مثلا بينما في حالة One and Half ستكون لكل دائرة عدد 1.5 من الـ CBs لكنها منفصلة عن بقية الدوائر في الشبكة. لاحظ في Ring System أن أي عطل على دائرة سيتسبب في فصل 2-CBs و فصل الدائرة دون تأثير على بقية الدوائر .

ويعيبه أن نظام الحماية معقد لأنه يحتاج لفصل اثنين من القواطع (Circuit Breakers) لعزل الخط الذي حدث له عطل (Fault).

كما أنه يحتاج إلى محول جهد (Voltage Transformer) لكل دائرة لأنه يعتمد على الوقاية الاتجاهية Directional OC Protection ، وذلك بسبب احتمالية تغير اتجاه التيار من وقت لآخر.

يعيب هذا النظام أيضا أن مرونته للتوسع مستقبلا ضعيفة جدا ، كما أنه عند الصيانة أو لأي سبب آخر لفتح الدائرة يصبح النظام مقسوما لجزئين مفتوحين وأي عطل جديد على أى جزء منهما سيتسبب فى خروج كافة محولات هذا الجزء . بمعنى آخر أن اعتمادية النظام أثناء الصيانة ضعيفة على عكس منظومة الـ One and Half والتي تظل كل Bay فيها مستقلة بذاتها سواء فى التشغيل العادى أو أثناء الصيانة.

14.6 مقارنات بين الأنواع المختلفة

اختيار نوع القضبان لأي محطة تحويل يعتمد على أهمية المحطة وموقعها وكيفية التوسع في المستقبل . وهناك عناصر أخرى للمقارنة منها:

1- الأسعار :

Table 14-2

Configuration	Relative Cost Comparison
Single Breaker-Single Bus	100%
Main-Transfer Bus	140%
Ring Bus	125%
Breaker and Half	145%
Double Breaker-Double Bus	190%

Reference: IEEE 605-2008

2- الاعتمادية

Table 14-3

λ = Annual Fail Rate

r = Annual Outage Time

U = Average Outage Time

Configuration	λ (/yr)	r (min)	U (min/yr)
a	0.0489	72.15	3.53
b	0.0453	71.95	3.26
c	0.00301	184.56	0.56
d	0.00567	124.216	0.70
e	0.0174	81.88	1.42

- a. Single bus
- b. Sectionalized single bus
- c. Breaker-and-a-half
- d. Double breaker-double bus
- e. Ring bus

15

تأريض محطات التحويل

يهدف تأريض المعدات الكهربائية إلى وقاية العاملين من الصدمات الكهربائية الناتجة من ارتفاع الجهد على جسم المعدات المعدنية المكشوف والمعرض للمس (جهد للمس). وكذلك يهدف إلى الوقاية من الصدمات التي تنشأ من الجهد الذي يظهر على سطح الأرض بين قدمي شخص بالمحطة (جهد الخطوة) ، كما يعمل على زيادة فعالية أداء أجهزة القطع والحماية في حالة وجود تيار عطل أرضي في هذه المعدات ، فتشعر بالعطل وتفصله بصورة أسرع .



Figure 15-1 تأريض تسليح الكابل

وتنقسم نظم التأريض إلى:

- تأريض نقطة التعادل Neutral earthed
- تأريض وقائي للجهد المنخفض (راجع كتاب المرجع في التركيبات والتصميمات الكهربائية للمؤلف)
- تأريض وقائي للجهد العالي حيث يتم تأريض جميع الأجزاء المعدنية Frames الخاصة بالسويتشجير والمحولات وحتى أغلفة الكابلات Cable sheath كما يظهر ذلك في الصورة شكل 15-1، وأيضا مواسير الكابلات الموجودة بالمحطة. حيث يوجد دائما أرضى عام تتصل به جميع معدات المحطة. وهو موضوع هذا الفصل.

15.1 فكرة الأرضى

والفكرة الأساسية أن تيار العطل إن لم يجد مسار معدنيا لى يعود من خلاله إلى مصدره فإنه يعود من خلال الأرض كـ Return Path ، وبالتالي يكمل دائرته بالوصول لنقطة تعادل المصدر المنشأ له.

و القيمة المسموح بها لأرضى المحطات الفرعية (الجهد العالى) تتراوح بين 0.5 إلى 1 أوم. بينما تصل القيمة إلى 5 أوم فى محطات التوزيع (الجهد المتوسط). والجدول 1-15 يعطى قيما لمقاومة التأريض فى الأماكن المختلفة.

Table 15-1 قيم مقاومة التأريض فى الأماكن المختلفة

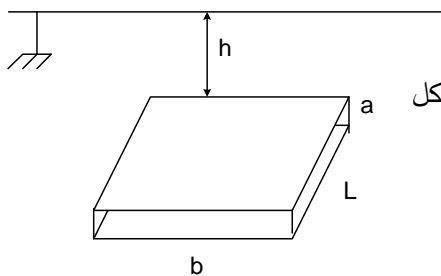
Particulars	Permissible values
Power Stations	0.5 Ohms
EHT Substations	1.0 Ohms
33KV Stations	2.0 Ohms
D/T centers	5.0 Ohms
Tower foot resistance	10.0 Ohms

لاحظ أنه لو كانت مقاومة الأرضى مرتفعة لظهر جهد على سطح الأرض مرتفع جدا Ground Potential Rise يقدر بقيمة تساوى قيمة تيار العطل مضروباً فى مقاومة الأرض ، ولذا نحتاج لتقليل هذا الجهد من خلال شبكة الأرضى ذات المقاومة المنخفضة جدا كما سنرى.

15.1.1 أشكال التأريض

هناك طرق متعددة لعمل نظام التأريض حسب مستوى الجهد وخطورة تيار القصر كما ذكرنا. ففي الجهد المنخفض قد يكون كافياً استخدام إلكترود تأريض واحد فى حديقة المبنى مثلاً لتحقيق مستوى الأمان وذلك بتوصيله للوحة العمومية ومنها إلى بارات التأريض باللوحات الفرعية ومنها إلى النقاط المراد تأريضها. وفى هذه الحالة ، إذا كان إلكترود التأريض على شكل ماسورة اسطوانية مثلاً قطرها d وطولها L فإن مقاومة الأرضى حينئذ تحسب من المعادلة التالية:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \ln \frac{8L}{d}$$



وفى الجهود المتوسطة نستخدم أحياناً شريحة أفقية لها سمك a وطولها L وعرضها b ، ومدفونة أفقياً على عمق h كما فى الشكل ، وفى هذه الحالة تكون مقاومة الأرضى تساوى :

$$R = \frac{\rho}{4 \pi L} \left[\ln \frac{8L^2}{ah} + \frac{a^2 - \pi a b}{2(a+b)^2} - 1 + \frac{h}{L} + \frac{h^2}{4L^2} \right]$$

ويمكن إهمال سمك الشريحة وحساب مقاومة الأرضي R لقطب عبارة عن لوح معدني مساحته A من العلاقة التقريبية التالية (المواصفات القياسية IEEE-80-1986)

$$R = \frac{\rho}{2A} \sqrt{\left(\frac{\pi}{2A} \right)}$$

15.2 التأسيس في محطات الجهد العالي

أما في محطات الجهد العالي فالأمر أعقد وأصعب من ذلك ، والسبب الرئيسي في ذلك له علاقة بمسار تيار العطل ، فإذا كان مسار رجوع تيار العطل يمر من خلال الأرض وليس من خلال Cable sheath مثلاً فستكون لدينا مشكلة تتعلق بتوزيع الجهد على سطح الأرض الناتج من هذا عطل والذي يسمى Ground Potential Rise.

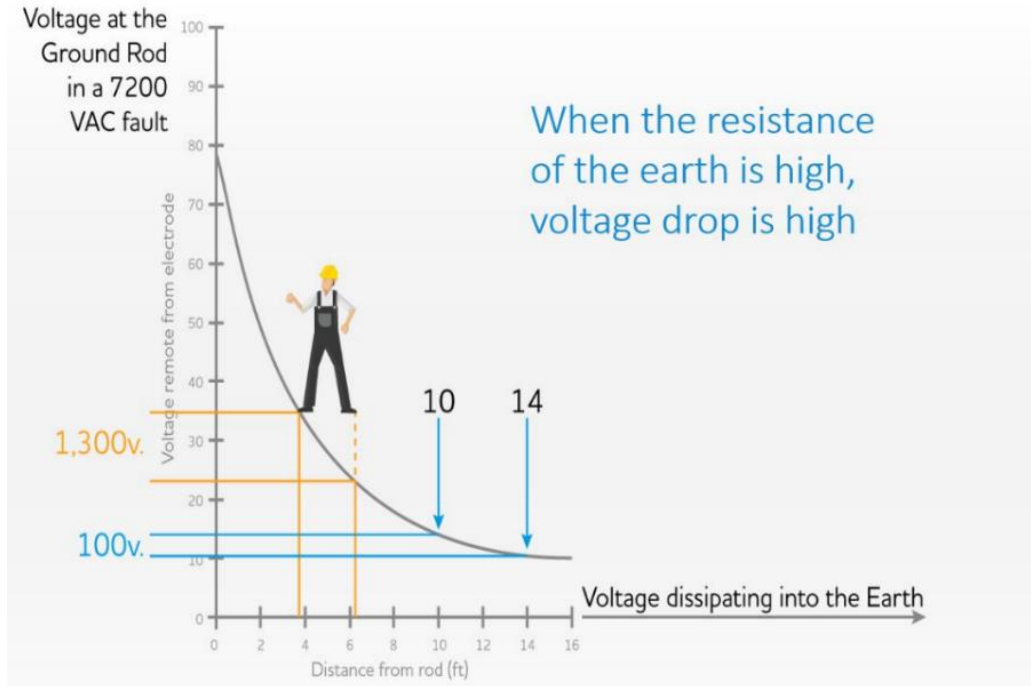


Figure 15-2 GPR

فعندما نقول أن مقاومة نظام الأرضي في محطة ما تساوي 1Ω مثلاً فهذا يعني أن المقاومة الكهربائية من نقطة تلامس أى سطح معدني بالمحطة وحتى نصل إلى نقطة الـ Remote earth - والتي تمثلها الكتلة المنصهرة بمركز الأرض - تساوي واحد أوم. هذه المقاومة الكلية تحسب من المعادلات كما في الجزء السابق ، وبالتالي فعند مرور تيار العطل I_f يساوي مثلاً 10 kA خلال إلكترود مقاومته 8 أوم فإنه سيتسبب في ظهور جهد تراكمي

متزايد على سطح الأرض Ground Potential Rise, GPR ، يبدأ بقيمة جهد تساوى 80 kV عند الجسم المؤرض ويساوى $(I_F \times R_E)$ كما فى الشكل 15-2 . ملحوظة : جهد اللمس وهو المشكلة الأولى لا يساوى هذه القيمة كلها بل يساوى الفرق بينها وبين جهد نقطة خروج التيار من الجسم ، وينتهى إلى جهد يساوى صفرا عند مركز الأرض كما فى الشكل 15-2.

المشكلة الثانية هنا أن فرق الجهد على سطح الأرض بين 4-6 قدم مثلا من الجهاز المؤرض لايزال مرتفعا ، وقد يصل إلى 1300 فولت كما فى الشكل السابق ، ومن هنا تظهر خطورة جهد الخطوة فى هذه المحطات. وسيتم شرح المزيد عن جهد اللمس وجهد الخطوة لاحق.

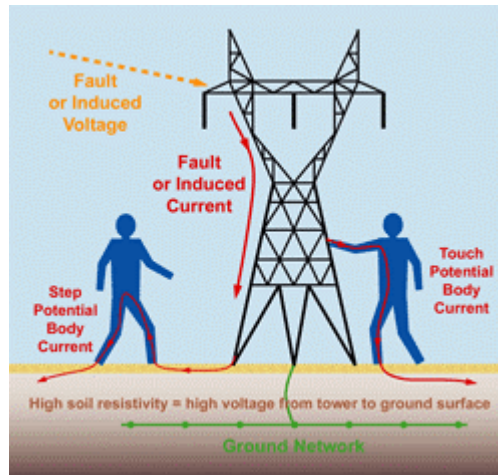
ومن هذه المقدمة يمكن الإجابة على السؤال التالى:

لماذا تكون الأعطال فى محطات النقل أخطر من الأعطال فى محطات التوليد؟

فى محطات التوليد يعود تيار العطل من خلال شبكة الأرضى فى المحطة وهى قيمة منخفضة فلا يحدث ارتفاع فى الجهد ، بينما فى محطات النقل يعود تيار العطل من خلال مقاومة الأرض الممتدة من نقطة العطل خارج المحطة وحتى المحطة نفسها فيرتفع الجهد بقدر ارتفاع قيمة مقاومة مسار الرجوع.

15.2.1 جهد اللمس

تعريف جهد اللمس: هو فرق الجهد بين جهد النقطة المعدنية التى يلمسها الإنسان ، وبين جهد شبكة الأرضى التى يقف عليها كما فى الشكل 15-3. ففرق الجهد الذى سيظهر على هذا الشخص سوف يساوى جهد نقطة اللمس مطروحا منه جهد النقطة التى يقف عليها بقدمه كما فى الشكل ، ويسمى هذا الفرق بجهد اللمس Touch Voltage، مع ملاحظة أن قيمة الجهد عند قدم هذا الشخص سيتوقف على منحنى توزيع الجهد Potential Distribution الذى ظهر فى الشكل 15-2 .



جهد اللمس وجهد الخطوة 15-15 Figure

15.2.2 لماذا نحتاج أن تكون مقاومة الأرضى منخفضة جدا؟

لاحظ فى الشكل السابق أن قيمة تيار العطل سيمر خلال مسارين :

- المسار الأول هو المار فى الشخص I_B ، وهذا سيتوقف على عدة عوامل منها قيمة مقاومة جسم هذا الإنسان R_B ، وعلى قيمة المقاومة بين قدمه والأرض R_F (Foot Resistance) ،
- والمسار الثاني سيوقف على مقاومة الأرضى R_E ، ومن ثم كلما كبرت مقاومات المسار الأول كلما كان الشخص فى أمان.

فأما مقاومة الجسم فهى فى أقصى قيمة لها ستساوى 10 ك أوم إذا كان الجسم جافا ، ولا توجد جروح فى الجلد . وأما المقاومة بين القدم والأرض فتزيد بالطبع إذا كان الشخص مرتديا حذاء أمان Safety Shoes ، وهذا هو السبب فى إلزام العاملين بالمحطات ارتداء هذه الأحذية .

على الجانب الآخر ستظهر أهمية أن تكون مقاومة إلكترود التأريض أقل ما يمكن حتى يمر معظم تيار العطل فى المسار ذى المقاومة المنخفضة وبالتالي يكون حاصل ضرب التيار فى المقاومة الأرضية أصغر ما يمكن ، ومن ثم يكون هذا الشخص فى أمان من جهد اللمس .

15.2.3 جهد الخطوة

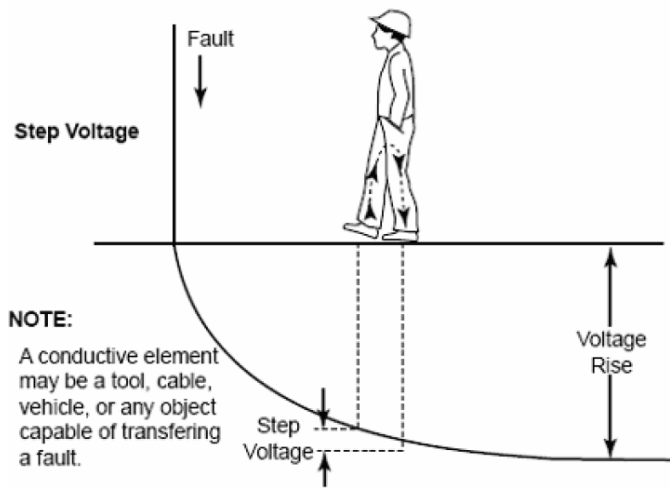
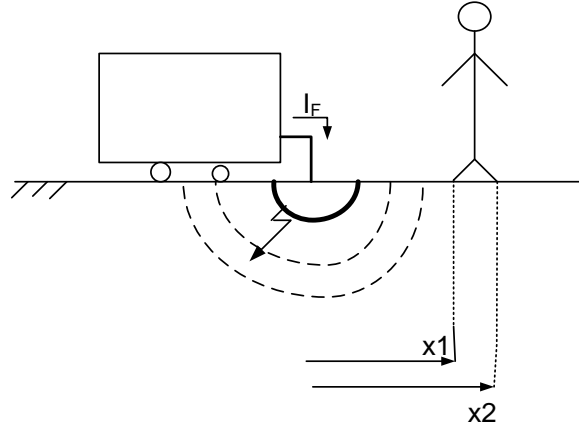


Figure 15-4 جهد الخطوة

أما إذا كان الشخص واقفا بجوار هذا المحول - ودون أن يلمسه - فهناك احتمال كبير لظهور فرق جهد بين قدميه لاسيما كلما اقترب العامل من نقطة العطل كما فى الشكل 4-15 حيث يكون معدل ميل منحنى توزيع الجهد كبيرا كلما اقترب من نقطة العطل.

فإذا كانت المسافة بين قدميه قدرها $(x_1 - x_2)$ كما فى الشكل فإنه سيكون أيضا معرضا فى حالة تسرب تيار قدره I_F من المحول إلى الأرض لنوع آخر من الجهود يسمى جهد الخطوة Step Voltage ويحسب من المعادلة التالية (بفرض أن إلكترود التأريض من النوع النصف كروى) :



$$V_{step} = \frac{\rho I_f}{2\pi} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$$

ومن واضح أنه كلما زادت المسافة بين قدميه ($x_2 \gg x_1$) ، كلما صار جهد الخطوة أخطر .

ملحوظة هامة:

هناك فرق بين جهد شبكة الأرضى والذي يسمى ground Potential Rise, GPR ، وبين جهد سطح الأرض ، فجهد سطح الأرض يتغير حسب نوع وسمك طبقة الحصى التى توضع على سطح الأرض ، ويختلف بالطبع حسب وجود شبكة أرضى تحت الأرض من عدمه ، وجهد سطح الأرض دائما يكون أقل من الـ GPR.

15.2.4 كيف تحل مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة؟

من المقدمة السابقة يمكن أن نصل إلى أن هذه المشكلة سببها الرئيسى هو الميل الكبير فى منحنى توزيع الجهد ، فلو استطعنا أن نجعل منحنى توزيع الجهد شبه أفقى فهذا يعنى أن الفرق بين أى نقطتين عليه لن يكون كبيرا وبالتالي لن تظهر مشكلة جهد اللمس وجهد الخطوة. والشكل 5-15 يمثل مقارنة بين الجهد الذى يظهر على جسم شخص واقف على الأرض نتيجة لمسه لمحول مؤرض فى حالتين :

1- بواسطة إلكتروود مدفون رأسيا فى الجزء الأيسر من الشكل.

2- شبكة تأريض Grid فى الجزء الأيمن من الشكل.

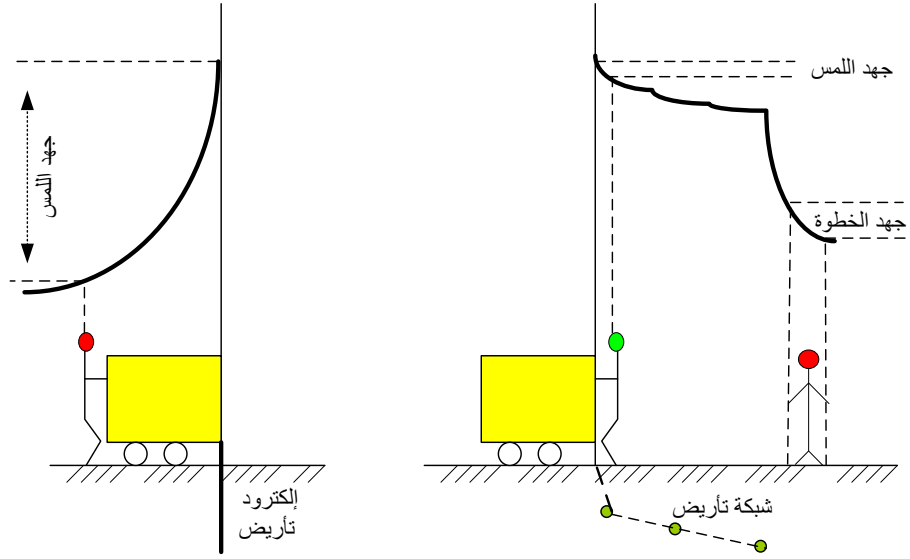


Figure 15-5 Grid and Rod Earthing

إن من مميزات شبكة التأريض أن توزيع الجهد على سطح الأرض Surface Potential Distribution الناشئ نتيجة مرور تيار العطل يكون أفضل من توزيعه في حالة الإلكتروود الواحد المدفون رأسياً .

15.3 شبكات التأريض في المحطات الكهربائية

في الأماكن مثل محطات التوليد أو محطات المحولات ، يمكن أن تتسبب تيارات الأعطال في ارتفاع قيمة الجهد على موصلات التأريض لقيم خطيرة على العاملين في هذه المحطات ما لم تكون مقاومة الأرضي فيها شديدة الانخفاض ، ولذا تخضع هذه الأماكن لنظام تأريض مختلف وهو المعروف باسم شبكة التأريض Grid مكونة من مجموعة من الـ Meshed Electrodes تكون المقاومة المحصلة لهم صغيرة جداً .

وغالبا تكون الشبكة من مربعات بأبعاد من 3-20 متر (تتغير حسب التصميم) وتغطي كافة مساحة المحطة ، كما في الشكل 15-6 (أيضا 11-15 لاحقا). لاحظ كيف أن شبكة التأريض تخرج أبعد من سور المحطة.

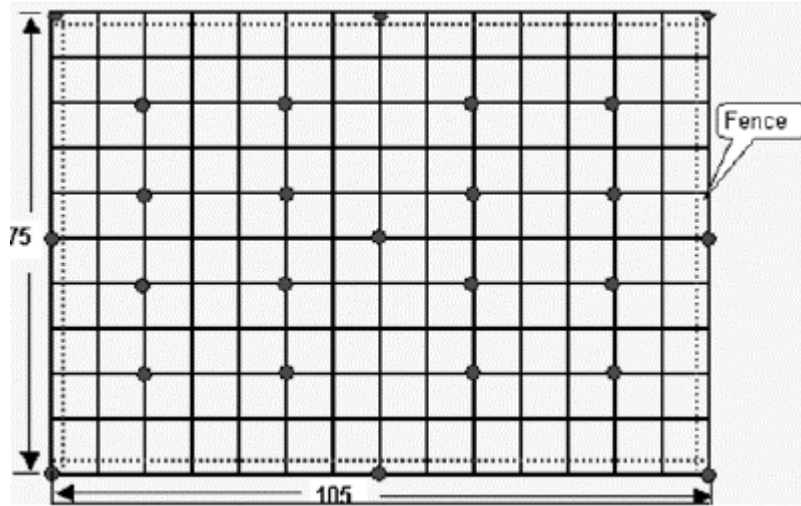


Figure 15-6 Earthing Grid

وقد تضاف إليهم Earthing mat كما في الشكل 15-7 عند المناطق عالية الخطورة ، لكن الأهم من ذلك أن هذا النظام يتميز بأن توزيع الجهد في المساحة المغطاة بالـ Meshed Electrodes يكون شبه متساوي Equi-potential ، وبالتالي ففرق الجهد بين نقطتين متقاربتين يكون صغيراً (يمكن أن يحدث تزايد تدريجي بدءاً من نهاية حدود شبكة التأسيس).

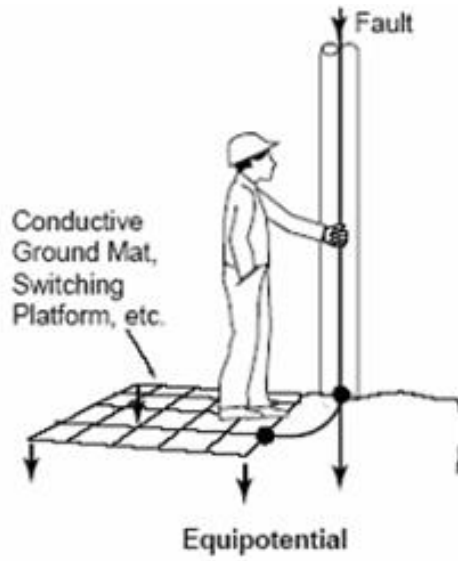


Figure 15-7 Earthing Mat

والشكل 15-8 يبين مستوى الارتفاع في الجهد في المناطق المختلفة من مساحة المحطة ، كما يظهر من خلال برامج التمثيل مثل الـ ETAP.

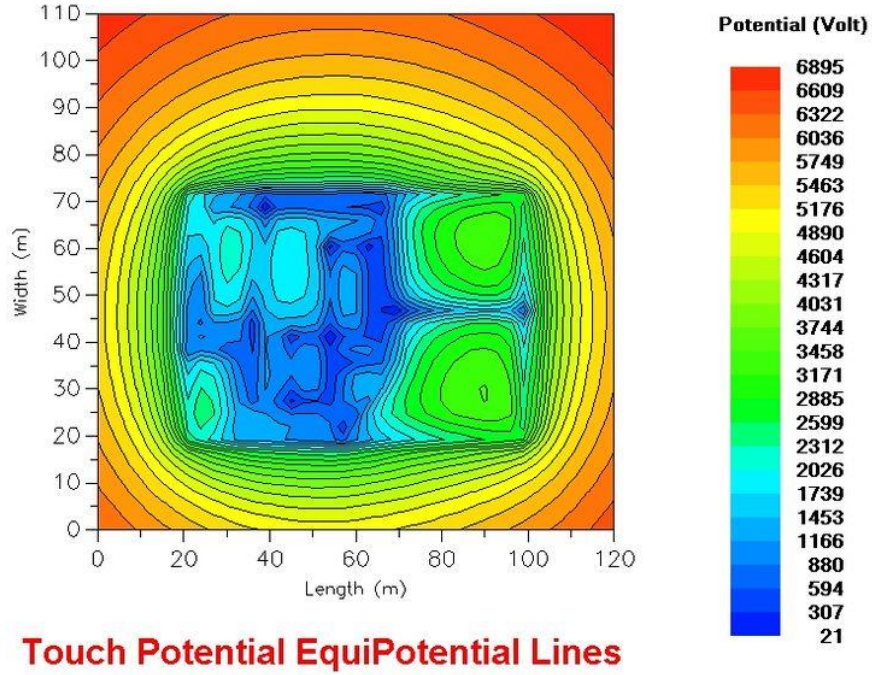


Figure 15-8

15.3.1 ما هي الـ Ground mat ؟



Figure 15-9 Earthing Mat

فى بعض الأحيان قد نستخدم ما يسمى حصيرة أرضية إضافية Ground mat وهذه لا تستخدم منفردة بل بالإضافة إلى شبكة الأرضى Ground Grid الأصلية ، وذلك فى الأماكن التى يكثر وجود البشر بها داخل المحطة مثل منطقة وقوف العمال أمام عدادات القياس مثلا ، وهى عبارة عن موصلات متقاطعة مع بعضها لتكوين شبكة تدفن فوق الشبكة الأصلية (شكل 15-9) ، وأحيانا توضع فوق سطح الأرض مباشرة (شكل 15-10) ، لأن مجرد الوقوف على سطح معدنى يعنى أن جميع أجزائه متساوية الجهد فلا يحدث فرق جهد بين قدمي من يقف عليه .



Figure 15-10 External Earthing Mat

ويستخدم هذا الأسلوب فى المناطق التى يكون جهد الخطوة واللمس بها مرتفع نسبيا. وهذه الشبكة قد يتصل وقد لا يتصل بها Earthing Rods عند أركانها.

15.3.2 أشكال الـ Earthing Grid

قد تكون شبكة التأريض فى المحطات عبارة عن شبكة تغطى مساحة كافة العنبر (شكل 15-11).

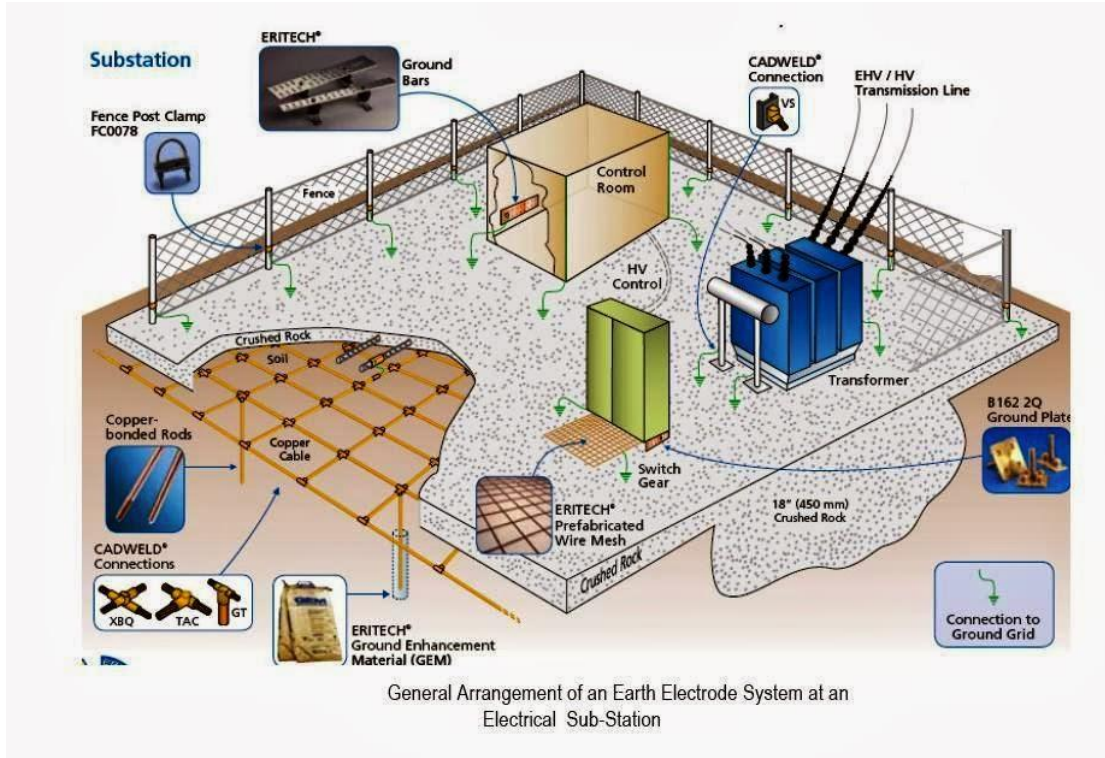


Figure 15-11 Earthing Grid

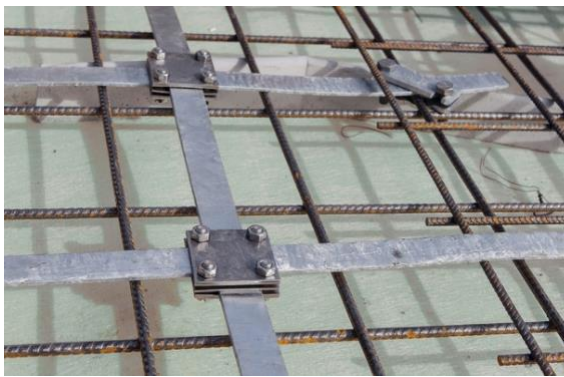


Figure 15-12 الربط مع حديد التسليح

وقد تكون هذه الشبكة أيضا متصلة بأساسات المبنى كما فى الصورة شكل 15-12 ثم يصب عليهم الخرسانة جميعا (بالطبع بعد توصيل طرف الشبكة خارج سطح الأرض). وهذا الأسلوب مفيد جدا فى تخفيض جهد الخطوة واللمس لأن شبكة حديد التسليح تعمل كـ Ground mat .

ملحوظة: فى بعض الأحيان يمكن الاكتفاء بحديد التسليح دون الحاجة لموصلات نحاسية.

وحسابات الـ Ground Grid يدخل فيها عدد كبير من المتغيرات وهذا هو ما نناقشه تفصيلا فى الجزء التالى.

15.4 خطوات التصميم

الهدف الرئيسى من عملية تصميم شبكة الأرضى فى المحطات الكهربائية ذات الجهد العالى وهو : التأكد من أن Step Voltage and Touch Voltage ضمن الحدود الآمنة.

وتحقيق ذلك يتم من خلال حساب العدد المناسب للإلكتروادات التأريض وكيفية توزيعها داخل المحطة . ويعتبر البحث المرجعى رقم (2000) IEEE STD 80 وعنوانه : "Guide for safety in AC substation : grounding" مرجعا أساسيا فى عملية تصميم نظام التأريض فى محطات التحويل.

وفى هذا الفصل سيتم شرح وتلخيص الخطوات القياسية المذكورة فى هذا المرجع على النحو التالى:

1. Measurements of Soil Resistivity
2. Determine Surface Layer Derating Factor
3. Determine Minimum Earthing Conductor Size
4. Calculate Tolerable Step and Touch Potential
5. Layout Preliminary Substation Grid,
6. Determine Preliminary Resistance of Grounding System
7. Determine Grid Current
8. Determine GPR. If Less than Tolerable Touch Voltage, Done.
9. Otherwise: Calculate Actual Mesh and Step Voltages.
10. If Mesh and Step Voltage Are Below Tolerable values, Done.
11. Otherwise: Revise Grid.

15.4.1 خطوات ما قبل التصميم

قبل الخوض فى تفاصيل التصميم نذكر أن هناك معلومات يجب توافرها قبل البدء فى التصميم ، وهذه المعلومات المطلوب توافرها هى :

- مخطط عام الموقع وتحديد مساحة المحطة
- أقصى تيار عطل متوقع مروره خلال شبكة التأريض وهذا يحسب من خلال Short circuit Study
- أقصى زمن يستغرقه جهاز الحماية لفصل العطل وهذا يمكن معرفته بعد الانتهاء من الـ Protective Coordination Study ، وسنستفيد منه فى معرفة قيمة الجهد الذى يظهر على جسم إنسان تعرض للصعق بالمحطة حيث أن هذه القيمة تعتمد على زمن بقاء العطل كما سنرى.
- درجة حرارة التربة

- معرفة قيمة المقاومة النوعية للتربة Soil Resistivity بالقياس .
 - معرفة قيمة Resistivity لأي طبقة سطحية مضافة على التربة (مثل الزلط مثلا)
- كل المعلومات السابقة يفترض أنها معلومة قبل البدء فى خطوات التصميم التالية.

15.4.2 الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة

ربما يكون كافيا فى مشروعات التخرج أن يفترض الطالب قيمة مناسبة لـ Soil Resistivity (المقاومة النوعية للتربة) ، أما حين تنشأ محطة حقيقية فلا بد من عمل قياسات عملية للوصول للقيم الحقيقية للمقاومة النوعية للتربة. ومن أشهر هذه الطرق طريقة Wenner four-pin method وسبق شرحها فى كتاب المرجع فى التركيبات الكهربائية للمؤلف. والجدول 2-15 يعطى قيم تقريبية للمقاومة النوعية حسب نوع التربة (لا تستخدم هذه القيم فى تصميم حقيقي بل يجب عمل قياسات).

المقاومة النوعية للتربة Table 15-2

Table 1: Basic Range of Soil Resistivity
Ref. IEEE Std, 80, Table 8. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Type of Earth	Average Resistivity ($\Omega \cdot m$)
Wet Organic Soil	10
Moist Soil	10^2
Dry Soil	10^3
Bedrock	10^4

ويفضل أخذ القياسات عند أكثر من نقطة فى المساحة المقترحة لبناء المحطة ، كما يفضل جعل المسافات بين الإلكترودات الأربعة المستخدمين فى القياس Four Electrode method كبيرة نسبيا وفى حدود 50-100 متر وكلما زادت هذه المسافة كلما كانت القراءة معبرة عن قيمة المقاومة على أعماق كبيرة (تقريبا يمكن اعتبار المقاومة مقاسة على عمق يساوى المسافة بين كل اثنين من الإلكترودات الأربعة).

وقيمة المقاومة الكهربائية للتربة تتوقف على كمية الأملاح بالتربة (تزيد بزيادتها) وتتوقف أيضا على حجم حبيبات التربة (أيضا تزيد بزيادتها) فالرمل الخشن مقاومته أعلى من الرمل الناعم ، والزلط مقاومته أعلى من الرمل ، والرمل أعلى من الطين.

15.4.3 الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

دائماً تضاف طبقة من الحصى أو الزلط بسمك من 5 إلى 15 سم لتحسين المقاومة النوعية لسطح التربة من أجل أن يقل خطر الـ Touch and Step Voltage . وبالمطبع ستتأثر المقاومة النوعية لهذه الطبقة بحالة التربة وهل هى رطبة أم جافة ولذلك ستجد الجدول رقم 3-15 يعطى قيما تقديرية للمقاومة النوعية لهذه الطبقة حسب نوع المادة المستخدمة وحالتها وسمكها .

Table 15-3

Table 2: Typical Surface Material Resistivities.

Ref. IEEE Std, 80, Table 7. Copyright ©2000. IEEE. All rights Reserved

Number	Description of surface material (U.S. State where found)	Resistivity of sample $\Omega \cdot m$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	140×10^6	1300(ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
2	1.5 in(0.04m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200(rain water, 100W)
3	0.75-1 in(0.02-0.025 m) granite (Calif.) with fines	-	6513(10 min after 45 $\Omega \cdot m$ water drained)
4	#4 (1-2in) (0.025-0.05 m) washed granite (Ga.)	1.5×10^6 to 4.5×10^6	5000 (rain water, 100 $\Omega \cdot m$)
5	#3 (2-4 in) (0.05-0.1 m) washed granite (Ga.)	2.6×10^6 to 3×10^6	10 000 (rain water, 100 $\Omega \cdot m$)
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	7×10^6	2000-3000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02m) gravel	2×10^6	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40×10^6	5000
9	#57 (0.75 om) (0.02 m) washed granite (N.C.)	190×10^6	8000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
10	Asphalt	2×10^6 to 30×10^6	10 000 to 6×10^6
11	Concrete	1×10^6 to 1×10^9 ^a	21 to 100

وأهمية هذه الطبقة تأتى من أنها تلمس مباشرة قدمى الشخص وهذه الطبقة غير سميكة وسطحها غير منتظم ، ومن ثم سنحتاج لحساب معامل تصحيح C_s لتصحيح قيمة مقاومة سطح التربة ، و سنتسهم هذه الطبقة فى تقليل مقاومة الأرضى إن وجدت وذلك بنسبة تساوى هذا المعامل C_s الذى تتوقف قيمته على المقاومة النوعية للتربة الأصلية وسمك الطبقة السطحية كما فى المعادلة التالية:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

Where C_s is the surface layer derating factor

ρ is the soil resistivity ($\Omega.m$)

ρ_s is the resistivity of the surface layer material ($\Omega.m$)

h_s is the thickness of the surface layer (m)

وسنستفيد من هذا المعامل لاحقا عند حساب الـ Touch and Step Voltage

ومعامل التصحيح Cs يساوى واحد إذا لم تكن هناك طبقة على السطح ، ويصبح أقل من الواحد فى وجود هذه الطبقة الرقيقة .

وهذه الطبقة لها ميزات عديدة ، فهي بالإضافة إلى كونها تعتبر مقاومة موصلة على التوالي مع جسم الإنسان مما يعنى أن التيار خلال الجسم سينخفض وقد يصل إلى عشر قيمته ، وهذه هى الميزة الأساسية لها ، فهي أيضا تعيق تبخر الماء من التربة الأصلية فتحافظ على انخفاض قيمة مقاومة التربة.

15.4.4 الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود

أحد أهداف عملية التصميم هو حساب مساحة المقطع المناسب لكل إلكترود من إلكترودات التأريض وعددهم . وفى هذه الخطوة سنحسب مساحة المقطع المناسبة.

وكما هو معلوم فإن مساحة مقطع الموصل تتوقف أساسا على قيمة تيار القصر والتيار الطبيعى ، ولكن على عكس الكابلات العادية والتي تكون حدود تحملها لتيار القصر متوقفا على تحمل العازل لدرجة الحرارة العالية الناشئة من القصر قبل أن يحدث له melting ، فإن كابلات التأريض لا يوجد عازل عليها ، ومن ثم فالحذ الأقصى هو تحمل الموصل نفسه للحرارة لمدة معينة قبل أن يحدث له melting (وهذا يفسر لك أحد أسباب عدم وجود عازل على موصلات التأريض) ، وهذه الدرجة يمكن الحصول عليها من الجدول 3-15 ، وقد تصل فى بعض المواد إلى فوق الـ 1000 درجة مئوية ، لكن للأمان فإن معظم التصميمات تكتفى بحساب حرارة الموصل عند 500 أو 800 درجة فقط.

لاحظ أن أقصى تيار قصر يتحمله الموصل يتوقف أساسا على المدة الزمنية التى يستغرقها مرور هذا التيار قبل فصله بأجهزة الحماية ، ولذا فمن المعلومات الأساسية المطلوب للتصميم : زمن تشغيل أجهزة الوقاية . ويمكن الرجوع فى هذه النقطة لكتاب المرجع فى التركيبات الكهربائية.

والـ IEEE-80 تعتبر زمن الفصل يمكن أن يتأخر حتى يصل إلى 3 ثوانى فى المحطات الصغيرة عند تصميم منظومة الأرضى .

وعموما فحساب مقطع موصل الأرضى يعتبر خطوة عامة فى تصميمات الأرضى ، ولا علاقة لها بالـ GPR أو جهد الخطوة ، وجهد اللمس.

طرق حساب هذا المقطع:

توجد طريقتان لحساب هذا المقطع :

الطريقة الأولى : باستخدام المعادلة التقريبية الواردة فى مواصفات الـ IEEE وهى:

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln \cdot \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right)}}$$

Where

- I : rms current (kA)
- A_{mm}^2 : conductor cross section (mm²)
- A_{kcmil} : conductor cross section (kcmil)
- T_m : maximum allowable temperature (°C)
- T_a : ambient temperature (°C)
- α_r : thermal coefficient of resistivity at reference temperature T_r (1/°C)
- ρ_r : resistivity of the ground conductor at reference temperature T_r (μΩ-cm)
- t_c : duration of current (s)
- K_0 : equals $1/\alpha_0$ or $(1/\alpha_r) - T_r$ (°C)
- $TCAP$: thermal capacity per unit volume (J/cm³ · °C)

والثوابت السابقة تجد قيمتها فى الجدول رقم 4-15

For example, commercial hard-drawn copper has material constants:

- $T_m = 1084$ °C درجة انصهار الموصل
- $\alpha_r = 0.00381$ °C⁻¹
- $\rho_r = 1.78$ μΩ.cm
- $TCAP = 3.42$ Jcm⁻³ °C⁻¹.
- $T_c = duration = 0.5$ sec
- $K_0 = 234$

والطريقة الثانية هى معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهى:

$$A (mm^2) = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76 t}{\ln \frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}$$

ومنها يمكن حساب قطر الموصل d وهذا سيستخدم فى الخطوة التاسعة من خطوات التصميم.

وهناك معادلة أخرى تقريبية

$$A (mm^2) = 8.832 \times I_{GF} \times \sqrt{T_C}$$

ويمكن فرض مقطع للموصل مباشرة حسب الـ IEEE-665-1995 بحيث يتم اختيار مقطع يتحمل نصف قيمة تيار العطل (أو 60% إذا أردت مزيداً من الأمان) ، وذلك على اعتبار أن تيار العطل يتسرب من جهتين خلال شبكة الأرضى.

اختيارات عملية:

1. زمن الفصل يؤخذ دائماً نصف ثانية للأمان.
2. فى بعض التصميمات يؤخذ حرارة انصهار العزل فى الاعتبار حيث تكون هناك بعض الأجزاء معزولة (لون عزل أسلاك الأرضى هو الأخضر فى أصفر) ففى هذه الحالة نعتبر درجة الحرارة ليست حرارة انصهار موصل الأرضى والتي قد تصل لـ 1000 درجة كما رأينا بل قد تحسب على أنها 200 درجة فقط. ولذا يجب التأكد أولاً من وجود أو عدم وجود موصلات معزولة فى منظومة التأريض لأن هذا سيغير من مساحة مقطع الموصل.
3. مقطع الموصل غالباً لا يقل عن 120 مم²
4. القيمة الكلية لتيار القصر I_{GF} لابد أن تأخذ فى الاعتبار قيمة مجموع تيارات الأعطال من داخل المحطة ومن خارجها. وتضاف نسبة أمان للتوسعات المستقبلية التى قد ترفع من قيمة تيار العطل.

Table 15-4 أنواع الموصلات

Table 3-Material Constants

Ref. IEEE Std 80-2000 Table 1. Copyright © 2000. IEEE. All rights reserved

Description	Material Conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft- drawn	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	64.0	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.00347	2268	654	3.28	2.60
Aluminum- clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Steel-1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.00160	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

^aFrom ASTM standards.^bCopper-clad steel rods based on 0.254 mm (0.010 in) copper thickness.^cStainless-clad steel rod based on 0.508 mm (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

.5

15.4.5 الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لتقييم جهد الخطوة وجهد

اللمس

عندما لا يجد تيار العطل مساراً ليكمل الدائرة سوى بالرجوع خلال الأرض تكون هناك خطورة من ارتفاع جهد الأرض حول منطقة العطل ويسمى Ground Potential Rises GPR وهذا يعنى أن أى شخص يقف على هذه الأرض يكون معرضاً لصدمة كهربية إما نتيجة فرق الجهد بين قدميه Step Voltage أو نتيجة فرق الجهد بين الجسم المعدنى الذى لمسه وبين الأرض Touch Volt.

فإذا كان لدينا شبكة تأريض مناسبة فسنقوم بتبديد تيار العطل بعيداً فى عمق الأرض ، وبالتالي لا يظهر GPR على سطحها وهذا كما ذكرنا فى المقدمة هو الهدف الأساسى من التصميم وهو أن نحصل على شبكة قادرة على جعل جهد الخطوة وجهد اللمس ضمن الحدود الآمنة بالمحطة. ومن هنا كان لابد أن نحسب أولاً قيم هذه الحدود الآمنة حتى نقارنها بقيم GPR التى يمكن أن تظهر على الشبكة.

والمعادلات التالية تعطى قيم تقريبية لجهد الخطوة وجهد اللمس (لاحظ أن تتوقف على وزن الشخص وتتوقف على نوع التربة والطبقة السطحية ومدة بقاء تيار العطل قبل فصله بأجهزة الوقاية). لاحظ أيضاً أهمية أن تكون منظومة الوقاية سريعة بالدرجة الكافية لتقليل هذه الجهود.

50kg person

$$E_{touch,50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person:

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

50kg person:

$$E_{step,50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

70kg person:

$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Where E_{touch} is the touch voltage limit (V)

E_{step} is the step voltage limit (V)

C_s is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2)

ρ_s is the soil resistivity ($\Omega.m$)

t_s is the maximum fault clearing time (s)

ملحوظة:

أصل المعادلات السابقة يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$E_{step} = (R_B + 2 \times R_F) \times I_B$$

$$E_{Touch} = (R_B + R_F \div 2) \times I_B$$

والرقم 1000 في المعادلات السابقة يمثل قيمة مفترضة لمقاومة جسم الإنسان.

لاحظ في حالة الـ Touch volt تكون المقاومتان أسفل القدمين R_{Foot} موصلتان على التوازي ولذا تقسم R_F على 2 ، بينما في حالة الـ Step Volt تكونان على التوالي ولذا تضرب في 2 كما في المعادلتين الأخيرتين.

15.4.6 الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها

يختلف توزيع الجهد على سطح الأرض الناشئ نتيجة مرور تيار العطل خلال هذه الإلكترودات ، Surface Potential Distribution فيكون أفضل في حالة الشبكة المكونة من عدة إلكترودات منه في الإلكترودات المدفونة رأسياً. ففي حالة الإلكترودات الأفقية (أو الشبكة) يكون قيمة الجهد الذي ينشأ على سطح الأرض بين نقطتين في المنطقة القريبة من الجسم المؤرض نتيجة مرور تيار العطل صغيراً جداً .

ولذا ستجد دائماً في محطات التحويل أننا نستخدم شبكة تأريض عبارة عن موصلات أفقية على شكل مربعات بطول ضلع يتراوح بين 3-6 متر ، بينما يصل طول الضلع

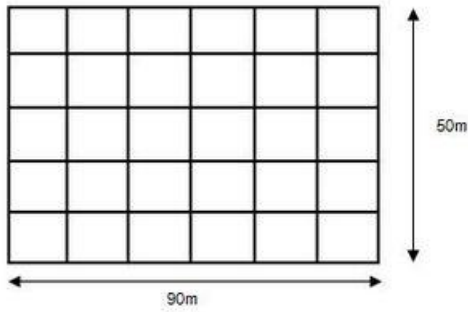


Figure 15-13

في تأريض محطات التوليد من 10 إلى 20 متر. وتوضع هذه الشبكة أسفل أرضية المحطة لضمان انخفاض قيمة جهد الخطوة وجهد اللمس كما في الشكل 13-15. لاحظ أن كل هذه الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية بـ 1 متر تقريباً ثم سنضيف لها إلكترودات رأسية إما عند نقاط التقاطع على محيط الشكل أو عند كافة نقاط التقاطع كما سنرى.

15.4.7 الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى

مقاومة شبكة الأرضى التى تم رسمها فى الخطوة السابقة تحسب من المعادلة التالية

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Where R_g is the earthing grid resistance with respect to remote earth (Ω)

ρ is the soil resistivity ($\Omega.m$)

L_T is the total length of buried conductors (m)

A is the total area occupied by the earthing grid (m^2) مساحة الأرض وليست مساحة الموصلات

h is the depth of the earthing grid (m)

ويتضح منها أن قيمة المقاومة تتوقف على :

1- إجمالى أطوال الموصلات الأفقية المستخدمة فى شبكة المربعات (الخطوة السابقة)

2- إجمالى عمق الإلكتروودات الرأسية (الخطوة السابقة)

3- عمق الدفن

4- المساحة المغطاة بشبكة التأريض (معلومة)

5- المقاومة النوعية للتربة (خطوة 1-)

وكما ذكرنا فهذه المقاومة ليست مقاومة كمية النحاس المدفون بل هى المقاومة المكافئة من نقطة التلامس حتى مركز الأرض.

15.4.8 الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض

وهو أقصى تيار عطل يمكن أن نحصل عليه من حسابات الـ Short Circuit . والأصل أن أقصى تيار هو الـ 3-phase short circuit current ويحسب من المعادلة التالية

$$I_{k3} = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_1|}$$

أما عطل الـ Single phase فيساوى

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot U_n}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|} = \frac{3 \cdot I_{k3}}{2 + |Z_0/Z_1|}$$

علما بأن تيار العطل يمكن أن يحدث له نقصان بنسبة S_f ، أو زيادة بنسبة D_f :

فيمكن أن ينقص نتيجة ما يسمى Surface factor, S_f (قيمه بالطبع ستكون أقل من واحد لكن لزيادة الأمان يمكن اعتباره يساوى واحد) ، ونقصد بذلك أن التيار يمكن ألا يرجع من خلال شبكة الأرضى فقط بل يمكن أن يعود جزء منه خلال أغلفة الكابلات مثلا والباقي خلال شبكة الأرضى. لاحظ أن فرض قيمة $S_f = 1$ يعتبر نوعا من الأمان لكن على حساب التكلفة حيث ستزيد عدد الإلكترودات.

والشكل 14-15 يبين فكرة توزيع تيار العطل وطريقة رجوعه لمصدره. فتيار العطل الأصلى قيمته عند نقطة العطل كانت 2720 أمبير ، لكن هذا التيار رجع لنقطة التعادل فى المحول المغذى لهذا العطل من طريقين:

- الطريق الأول خلال تأريض كل برج حيث تسرب جزء من التيار ويتجمع ويعود عن طريق خط الأرضى الممتد فوق هذه الأبراج وهذا التيار مجموعه 875 أمبير (أو قد يعود خلال الـ Cable Sheath إذا كان النقل عبر كابلات أرضية). وهذا التيار لا يتسبب فى GPR ، ولذا لا يدخل فى حسابات جهد اللمس وجهد الخطوة.

- والطريق الثانى لرجوع تيار العطل كان من خلال الأرض مباشرة ومن ثم إلى إلكترودات شبكة التأريض بالمحطة ومنها لنقطة التعادل وهذا الجزء يساوى 1121 أمبير كما فى الشكل 14-15. وهذا هو الجزء الذى يهمنا لأنه المتسبب فى رفع قيمة جهد الأرض. ولذا يحسب GPR كالتالى:

$$GPR = I_G R_G$$

حيث I_G يمثل الجزء الثانى فقط من تيار العطل.

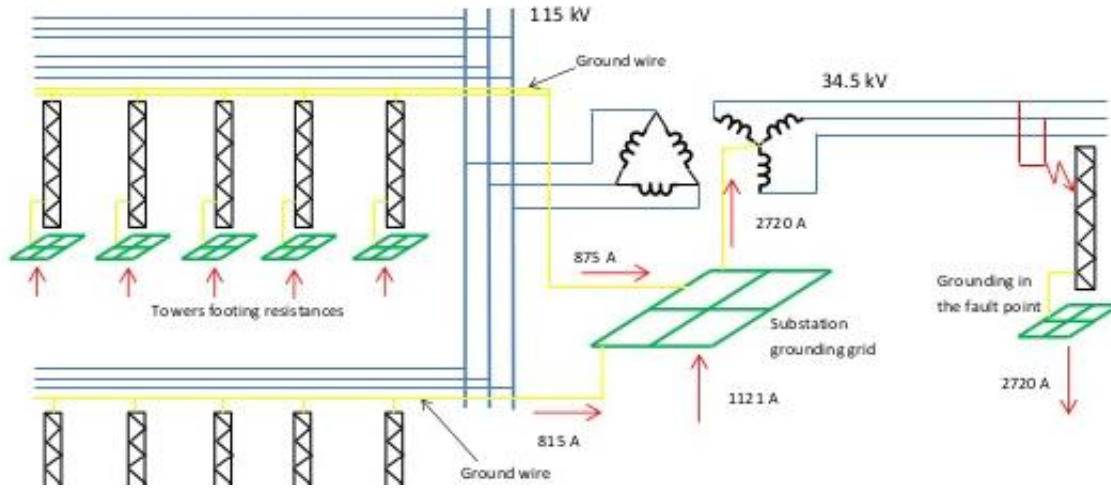


Figure 15-14 مسارات رجوع تيار العطل الخارجى

على الجانب الآخر ، هناك جزء إضافي يمكن أن يزيد من قيمة التيار نتيجة الـ magnetic coupling وأيضا نتيجة احتمال وجود DC component في العطل والتي تتوقف قيمتها على Time Constant الخاص بالشبكة ومكان العطل و هذا يحتاج إلى تقريب في حسابه. وعموما نسبة الإضافة تسمى Decrement factor وهي D_f تحسب من المعادلات التالية

$$I_G = I_g D_f$$

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)}$$

$$T_A = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

t_f is the duration of the fault (s)

T_A is the dc time offset constant

يمكن اعتبار $D_f = 1.25$ للتبسيط

15.4.9 الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR

فى هذه الخطوة نحسب قيمة الارتفاع فى الجهد على شبكة الأرضى نتيجة حدوث عطل

$$GPR = I_G R_g$$

Where GPR is the maximum ground potential rise (V)

I_G is the maximum grid current found earlier in Step 7 (A)

R_g is the earthing grid resistance found earlier in Step 6 (Ω)

ملحوظة :

- إذا كانت $GPR < V_{\text{step-4}}$ فهذا يعنى بالتأكد أن التصميم صحيح ونكون قد نصل لنهاية خطوات التصميم
- لكن إذا كانت $GPR > V_{\text{step-4}}$ فقد يكون التصميم سليماً وقد يكون خاطئاً ويصبح الفيصل فى الحكم هو القيم التفصيلية لجهدى الخطوة واللمس التى سنحسبها فى الخطوة التالية. ولذا قد نحسب فى بعض الحالات القيم التفصيلية ونكتشف أنها أقل من المسموح رغم أننا لم نغير شيئاً فى التصميم وهذا يؤكد على ما قلناه أن كون الـ GPR كبيراً لا يعنى بالضرورة خطأ التصميم.

15.4.10 الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس

الحقيقيين

تحقيق القيم الآمنة لقيم هذه الجهود هو الهدف الأسمى لتصميم شبكة الأرضى كما ذكرنا فى المقدمة .

أولاً حساب جهد اللمس

فأما قيمة جهد اللمس (ويسمى Mesh Voltage) فتحسب من المعادلة

$$E_m = \frac{\rho_s K_m K_i I_G}{L_M}$$

Where

the surface soil resistivity ($\Omega.m$) ρ_s

the maximum grid current (A) I_G

the geometric spacing factor K_m

the irregularity factor K_i

the effective buried length of the grid L_M

ثانيا حساب جهد الخطوة

المعادلة التالية تعطى قيمة جهد الخطوة:

$$E_s = \frac{\rho_s K_s K_i I_G}{L_s}$$

Where ρ_s is the soil resistivity ($\Omega.m$)

I_G is the maximum grid current (A)

K_s is the geometric spacing factor

K_i is the irregularity factor (as derived above in the mesh voltage calculation)

L_s is the effective buried length of the grid

والحسابات هنا تأخذ فى اعتبارها بالإضافة إلى قيمة تيار العطل قيمة التباعد بين الموصلات الأفقية وعمق دفن الإلكتروودات الرأسية ومجموع أطوال الموصلات المدفونة تحت الأرض أفقيا ، وأيضا مجموع أطوال الإلكتروودات الرأسية. ويمكن الرجوع للمرجع الأصلي للمزيد من تفاصيل هذه الثوابت.

مع ملاحظة أن البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP تعتبر مثالية لتنفيذ هذه الحسابات ، وما عليك سوى فهم معانى المفردات المستخدمة فى هذه البرامج ، وإدخال البيانات المناسبة لشبكته.

15.4.11 الخطوة العاشرة : المقارنات

وصلنا لنهاية الرحلة وبقي فقط أن نتأكد هل هذا التصميم يحقق الحدود الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس (وهو الهدف الأسمى للتصميم) أم لا. فإذا تحقق الشرطان التاليان فالتصميم صحيح :

$$\begin{aligned} E_m &< E_{touch} \quad . \\ E_s &< E_{step} \quad . \end{aligned}$$

وإلا نعيد التصميم مع عمل بعض التعديلات منها مثلا:

- 1- تقليل مقاومة الأرض بزيادة عدد الإلكتروودات أو زيادة مساحة المقطع.
- 2- تقليل تيار العطل باستخدام الـ Current Limiter مثلا
- 3- تحسين المقاومة التربة
- 4- تحسين المقاومة النوعية لسطح التربة

EXAMPLE**المعطيات:**

- 1- المساحة 50 متر عرض و 90 متر طول
- 2- تيار القصر 3.15 kA أمبير
- 3- زمن فصل العطل 0.5 sec
- 4- زمن الإحساس بالصدمة 0.15 sec
- 5- درجة الحرارة 40 درجة مئوية
- 6- المقاومة النوعية للتربة $300 \Omega.m$
- 7- المقاومة النوعية للطبقة السطحية $3000 \Omega.m$ بسمك 10 سم

الحل**الخطوة الأولى: قياسات المقاومة النوعية للتربة**

- طبقا للمعطيات فإن المقاومة النوعية للتربة تساوى $300 \Omega.m$.

الخطوة الثانية : حساب Surface Layer Derating Factor

- طبقا للمعطيات نجد أن المقاومة النوعية للطبقة السطحية $3000 \Omega.m$ بسمك 10 سم وبالتعويض بهذه القيم (المقاومة النوعية للتربة و سطح التربة وسمك طبقة سطح التربة في معادلة حساب C_s نحصل على الآتى:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$$\begin{aligned} C_s &= 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \\ &= 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{300}{3,000}\right)}{2 \times 0.1 + 0.09} \\ &= 0.7207 \end{aligned}$$

الخطوة الثالثة : حساب مساحة مقطع الإلكترود

بالتعويض فى المعادلة

$$A_{\min} = I_{fs} \cdot \sqrt{\frac{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP}}{\ln \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right)}}$$

الطريقة الأولى : بالتعويض فى المعادلة السابقة:

$$A = 31,5 \cdot \sqrt{\frac{\frac{0,5 \cdot 0,00381 \cdot 1,78 \cdot 10^4}{3,42}}{\ln \left(1 + \frac{1084 - 40}{242 + 40} \right)}} = 80,4 \text{ mm}^2$$

- $T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$ درجة انصهار الموصل
- $\alpha_r = 0.00381 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $\rho_r = 1.78 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- $TCAP = 3.42 \text{ Jcm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- $T_c = \text{duration} = 0.5 \text{ sec}$
- $K_0 = 242$
- $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

والطريقة الثانية هى معادلة تقريبية أيضا ولكن أكثر تبسيطا وهى:

$$A \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{I_d}{1973} \times \sqrt{\frac{76 t}{\ln \frac{234 + T_{cm}}{234 + T_{sm}}}}$$

ومنها أن الموصل المناسب هو 100 ملم² واحتياطا سنأخذ 120 ملم²

الخطوة الرابعة: حساب الحدود الآمنة لقيم جهد الخطوة وجهد اللمس

- 70kg person:

$$E_{touch,70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- 70kg person:

$$E_{step,70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

C_s is the surface layer derating factor (as calculated in Step 2) = 0.7207

ρ_s is the surface soil resistivity ($\Omega.m$) 3000 معطى

t_s is the maximum shock time (s) = 0.150 s زمن الإحساس بالصدمة معطى

$$\begin{aligned} E_{touch,70} &= (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\ &= (1000 + 1.5 \times 0.7207 \times 3,000) \frac{0.157}{\sqrt{0.15}} \end{aligned}$$

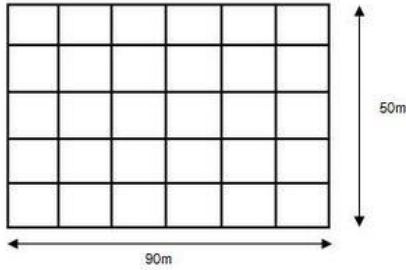
$$V = 1,720.04$$

$$\begin{aligned} E_{step,70} &= (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \\ &= (1000 + 6 \times 0.7207 \times 3,000) \frac{0.157}{\sqrt{0.15}} \end{aligned}$$

$$V = 5,664.03$$

الخطوة الخامسة : حساب عدد الإلكترودات واختيار طريقة وضعها

لدينا مساحة 90x50 فسيكون لدينا شبكة كما فى الشكل (6 صفوف و 7 أعمدة).



- الموصلات مدفونة أفقية تحت سطح الأرضية نفترض أنها على عمق 60 سم فى هذا المثال
- ثم سنضيف لها إلكترودات رأسية (بطول 3 متر) عند نقاط التقاطع الواقعة على محيط الشكل الخارجى وعددها هنا يساوى 22 نقطة .
- مقطع الموصل 120 ملم من الخطوة الثالثة

الخطوة السادسة : حساب مقاومة شبكة الأرضى

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

معطى $\rho = 300 (\Omega.m)$

$L_T = 90 \times 6 + 50 \times 7 + 22 \times 3 = 956$ (m) الكترود رأسي

$h = 0.6$ (m)

$A = 50 \times 90 = 4500 \text{ m}^2$

$$= 300 \left[\frac{1}{956} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 4,500}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6\sqrt{20/4,500}} \right) \right]$$

$$= 2.2753 \Omega$$

الخطوة السابعة : حساب قيمة أقصى تيار يمر بشبكة التأريض

سنفترض هنا للتسهيل أن تيار العطل بكامله يرجع من خلال شبكة الأرضى ولا يتفرع منه شئ (division factor is 1) وفرضا X/R تساوى 15 عند حدوث العطل وزمن العطل كما ذكرنا سابقا 150 مللى ثانية وسنحاول حساب الـ Decrement Factor, D_f

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f} \\ &= 15 \times \frac{1}{2\pi 50} \\ &= 0.04774 \end{aligned}$$

The decrement factor is then:

$$\begin{aligned} D_f &= \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}} \right)} \\ &= \sqrt{1 + \frac{0.04774}{0.15} \left(1 - e^{\frac{-2 \times 0.15}{0.04774}} \right)} \\ &= 1.1479 \end{aligned}$$

ومنه نحسب قيمة I_G

$$I_G = I_g D_f = 3.15 \times 1.14 = 3.559 \text{ kA}$$

أحيانا يؤخذ $D_f = 1.25$ للتسهيل

الخطوة الثامنة : حساب الارتفاع فى جهد شبكة الأرضى GPR

$$\begin{aligned} GPR &= I_G R_g \\ &= 3,559 \times 2.2753 \\ V &= 8,097 \end{aligned}$$

بما أن هذه القيمة تجاوزت القيم الآمنة لجهد الخطوة وجهد اللمس فى الخطوة الرابعة فهذا يعنى أننا بحاجة لحساب القيم التفصيلية لجهد اللمس وجهد الخطوة مع إعادة التصميم

الخطوة التاسعة : الحساب الدقيق لجهد الخطوة وجهد اللمس الحقيقيين

أولا حساب جهد اللمس

باستخدام برنامج الـ ETAP وإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد اللمس المحسوب يساوى 1661 فولت فى حين أن القيمة المسموح بها هى 1720 فولت وهذا يعنى أن التصميم قد تجاوز هذه الخطوة بنجاح.

ثانيا حساب جهد الخطوة

باستخدام برنامج الـ ETAP وإدخال نفس الأرقام فى هذا المثال سنجد أن جهد الخطوة المحسوب يساوى 723 بينما الجهد المسموح به هو 728 وهذا يعنى أنه تجاوز هذه الخطوة أيضا بنجاح.

الخطوة العاشرة المقارنات

الآن وضح من الحسابات التفصيلية أن التصميم باستخدام هذه الأعداد من الموصلات الأفقية والرأسية يعتبر الآن كافيا وآمنا.

ملحوظة هامة:

فى الساحات التى ليس بها هياكل معدنية فليس هناك احتمال أن يصاب أحد بصدمة كهربية نتيجة لمس شئ ، لكن المشكلة ستكون فقط فى جهد الخطوة ، ومن ثم يكون الاهتمام به فقط وهذا يمكن أن يؤدى إلى تقليل شبكة النحاس المستخدمة فى التأريض إذا أخذت هذه النقطة فى الاعتبار .

16

الأنظمة المساعدة في محطات التحويل

هناك العديد من الأنظمة التي تصنف بـ Auxiliary System ، وترتبط ارتباطاً وثيقاً بالمعدات الأساسية بالمحطة مثل :

1. منظومة تغذية مساعدات المحطة سواء بالـ AC Supply أو من خلال منظومة الـ DC Supply.
2. أجهزة الحماية والقياس : التي تقوم بحماية الدوائر الكهربائية وقياس القيم الكهربائية.
3. لوحات التحكم ومعدات الاتصالات : التي تقوم بالتحكم بتشغيل الأجهزة والمعدات الكهربائية إما عن طريق مركز المراقبة والتحكم باستخدام معدات الاتصالات المتوفرة في المحطة أو مباشرة من داخلها عن طريق شخص يكون مكلفاً بذلك .
4. أجهزة الفحص ومعدات السلامة والإطفاء وأجهزة التكييف والتبريد والتدفئة.
5. عدادات الطاقة الكهربائية ولوحات تسجيل الأعطال ولوحات الإشارة والإنذار.

القسم الرابع بالمحطات

تغذية مساعدات المحطة

يوجد بالمحطة نظامين لتغذية المساعدات **Auxiliaries** :

16.1 التغذية بنظام الـ AC SYSTEM :

وهو عبارة عن (Auxiliary Transformer + Distribution Board) وذلك لتغذية الأحمال الداخلية في المحطة مثل إضاءة المحطة و التكييف والمضخات وكباسات الهواء **compressors** إلخ. حيث يوجد بالمحطة محول مساعد أو أكثر يقوم بخفض الجهد من 11kV إلى 380 volt ليغذى الـ Main Distribution Board التي تقوم بدورها بتغذية أحمال المحطة.

والأحمال التي تتم تغذيتها بنظام الـ AC Auxiliary System تكون عادة:

- 1- لوحات الحماية Protection Panels
- 2- لوحات التحكم GIS Control Panels
- 3- لوحات توزيع المباني Buildings Power Distribution Boards
- 4- لوحات توزيع نظام التكييف Building HVAC Distribution Board
- 5- لوحات توزيع الإضاءة Building HVAC Lighting Board
- 6- MV Switchgear
- 7- UPS AC Loads
- 8- نظام إطفاء الحريق و المضخات

16.2 التغذية بنظام الـ DC SYSTEM :

وهو عبارة عن (Chargers + Batteries) .

ويوجد داخل كل محطة تحويل غرفة للبطاريات ، ويوجد بها مجموعات البطاريات الحمضية (قلوية في بعض المحطات) المستخدمة في تغذية دوائر الوقاية والطوارئ (220 / 110 فولت) وكذلك دوائر الاتصالات (48 فولت).

وتوجد البطاريات في غرفة خاصة حيث تنظم في صفوف كما في الشكل 1-16 . وتجري على البطاريات اختبارات دورية منها قياس المقاومة الداخلية و قياس جهد العمود وتركيز سائل البطارية.



Figure 16-1 Batteries

وفي بعض المحطات توجد جميع البطاريات في غرفة واحدة ، و في بعض المحطات توجد كل مجموعة بطاريات في غرفة منفصلة ، كما تخصص غرفة منفصلة للشواحن Battery Charger ، و لا يتم وضعها مع غرفة البطاريات حتى لا تتأثر بالغازات الخارجة من البطاريات.

والأحمال التي يتم تغذيتها بجهد 220V DC هي :

- a. إنارة الطوارئ Emergency Lighting
- b. لوحات حماية الكابلات Cables Protection Panels
- c. لوحات حماية المحول Transformer Protection Panels
- d. لوحات حماية رابط قضبان التوزيع Bus Coupler Protection Panels
- e. لوحات حماية قضبان التوزيع Bus bar Protection Panels

- f. لوحات التحكم عن بعد Remote Control Panels
 g. لوحات حماية الدخل Incoming Protection Panels
 h. لوحات حماية الخرج Outgoing Protection Panels
 i. 11 KV Switchgear

ملحوظة هامة:

العديد من الأجهزة الموجودة داخل المحطات من أجهزة تحكم أو أجهزة وقاية تعمل بالتيار المستمر و ليس التيار المتردد ، وعند عزل المحطة عن الشبكة الكهربائية تكون البطاريات هي مصدر التيار الوحيد المتاح و لذلك يجب الاهتمام بصيانة البطاريات و التأكد من صلاحياتها. ولأهمية هذه الأنظمة ، فدائما يؤخذ فى الاعتبار أن تكون سعة البطاريات كافية لتشغيل المحطة لمدة لا تقل عن 8 ساعات متصلة.

16.2.1 الشواحن : (Battery Chargers)



شاحن البطاريات Figure 16-2

وظيفة شاحن البطاريات battery charger في المحطات (شكل 16-2) هي:

- 1- إمداد جميع المعدات و أجهزة الوقاية بالتيار المستمر اللازم لتشغيلها.
- 2- شحن البطاريات.

وتغذي الشواحن لوحات توزيع (DC Panel) ، وكل لوحة تغذى مجموعة من الأحمال ، بالإضافة إلى تغذية واحدة من مجموعات البطاريات . كما توجد بغرفة الشواحن على الـ (DC Panel) عدادات لمتابعة حمل كل شاحن و قراءة جهد الخرج منه.

16.2.2 طرق شحن البطاريات :

- 1- الشحن الطبيعي أثناء التشغيل : (Floating) ويكون تيار الشحن ضعيفا (حيث توصل البطارية طوال الوقت بالشاحن لكي يقوم بتعويض عملية التفريغ الداخلي التي تحدث داخل البطارية).
- 2- الشحن السريع (Equalizing) يكون جهد الشحن أعلى من جهد البطارية وأعلى من جهد الشحن العادى لتنشيط البطارية أول مرة ، كما توضع عليه البطارية بعد كل عملية صيانة لمدة لا تقل عن ثمان ساعات فأكثر. وعموما لا يفضل الشحن السريع (high rate) لها إلا فى الاحتياج الشديد.

16.2.3 هل يؤثر سرعة الشحن على عمر البطارية؟

بعض الناس يظنون أن البطارية عبارة عن وعاء فارغ تصب فيه الإلكترونات كصب الماء ، ومن وجهة نظره أن الوعاء إذا سكبت الماء فيه بسرعة يملأ بسرعة وإذا سكبت فيه الماء ببطء يملأ ببطء، وهذا غير صحيح في حالة البطارية ، فالبطارية القابلة للشحن تحتوي على مركب كيميائي يحتاج للوقت ليتكون بصورة صحيحة ، ومن ثم فالسرعة والبطء كلاهما مرفوض ولذا فشركات البطاريات تحدد أنسب تيار للشحن حتى لا تفسد البطارية. (يرجع في ذلك للكتالوج).

16.2.4 عيوب وميزات البطارية الحامضية

أهم عيوب هذه البطاريات أنها:

- تحتاج لصيانة أكثر من البطاريات القلوية
- عمرها الافتراضي أقل
- حجمها كبير نسبياً وأثقل وزناً
- تتعرض لعملية الكبريتة sulphation (تكون أملاح الكبريتات عليها ويمكنها أن تسبب تلف البطارية)
- تصاعد الهيدروجين قد يؤدي إلى انفجار نتيجة اختلاطه بالأكسجين ولا يحدث ذلك إلا إذا زادت نسبة الهيدروجين عن 14% في الغرفة.

لكن لها ميزات عديدة أهمها:

- جهد العمود أو الـ cell فيها عالى نسبياً (2 - 2.2 - 2.4) فولت وهذا يعتبر أعلى جهد يمكن أن نأخذه من البطاريات السائلة وبالتالي فإننا نحتاج إلى عدد قليل من الخلايا بالبطارية الواحدة.
- المقاومة الداخلية لها أقل
- يوجد بها ثبات للجهد أثناء التفريغ
- كفاءتها أعلى 60 في المئة
- أرخص في الثمن ويوجد تنوع كبير في الساعات الخاصة بها من 1 أمبير.ساعة إلى عدة آلاف من الأمبير.ساعة
- لها أداء ممتاز في درجات الحرارة المرتفعة
- يمكن بسهولة معرفة حالة الشحن سواء مشحونة أو مفرغة من خلال قياس كثافة المحلول.

16.2.5 عيوب وميزات البطارية القلوية

يعيب هذه البطاريات:

- الجهد للعمود أو ال-cell قليل لا يتعدى 1.2 فولت
- المقاومة الداخلية للعمود أعلى من الحامضيه
- أعلى في الثمن
- كثافة المحلول لا تعطى مؤشرا لحالة الشحن.

لكن أهم ميزاتها:

- الصيانة أقل
- عمرها الافتراضي أعلى
- حجمها أقل
- أكثر أمانا

16.2.6 الشروط الواجب توافرها في غرفة البطاريات بمحطات الكهرباء :

ينتج من عملية شحن البطاريات غازات متصاعدة بالغرفة أهمها وأخطرها الهيدروجين القابل للانفجار إذا زادت نسبته في الغرفة عن 14% ، لذلك يجب أن تتوفر في الغرفة ما يلي:

- ◀ التهوية الجيدة بتركيب شفاط أو أكثر يطرد الهواء من داخل الغرفة للخارج
- ◀ توضع مفاتيح الإنارة خارج الغرفة ، وإن وضعت بالداخل يجب أن تكون من النوع ضد الانفجار (أى أنها معزولة تماما لعزل الشرارة الحادثة من التوصيل بلامسات المفتاح عند إنارة المصابيح بالغرفة لأنه من الطبيعي أنك ستضيء المصابيح بالغرفة قبل الدخول وربما ما يزال بالداخل غازات).
- ◀ الأرضية تكون من السيراميك الحراري و المقاوم للأحماض
- ◀ يجب أن يتوفر بالحجرة حوض مياه و حنفية تعمل بالضغط سواء باليد أو بالقدم و يفضل أن تعمل بالقدم و ذلك في حالة الإصابة للوجه أو اليدين بالحمض أو القلوي تذهب إلى الحوض فورا و تضغط بالقدم على الدواسة لتخرج المياه من الحنفية (غالبا تكون حنفيتين موجهتين لأعلى و بزاوية بحيث تغطي المياه الخارجة جانبي الوجه).
- ◀ الباب لا يكون خشبيا بل معدنيا و يجب أن يفتح للخارج و ذلك لسهولة الخروج بسرعة في حالة حدوث خطر.

16.2.7 صيانة البطاريات :

يتم فحص البطاريات بشكل دوري كل ستة أشهر للتأكد من تمام عملها وعمل الدوائر المصاحبة لها وتتم عملية الصيانة بالخطوات التالية :

- 1- فحص واختبار السائل الإلكتروليتي للبطاريات شهريا وزيادة منسوب السائل عند انخفاضه بإضافة ماء مقطر ويتم اختبار درجة الحمضية عن طريق ميزان الكثافة (الهيدروميتر) الذى يظهر فى الصورة المجاورة
- 2- فحص ألواح البطاريات نصف سنويا لتجنب تراكم أملاح كبريتات الرصاص التي يصعب تحليلها ونزعها من الألواح
- 3- اختبار سعة وجهد البطاريات عن طريق قياس معدل التفريغ لها ومقارنته بسعة البطارية
- 4- شحن البطاريات بواسطة جهاز الشحن واستبدال البطاريات في حالة حدوث التملح الشديد



16.2.8 أعطال البطارية وكيفية إصلاحها :

هناك العديد من الأعطال لكن أبرز هذه الأعطال :

- 1- تملح الألواح ، والسبب في ذلك هو التفريغ السريع أو تركها غير مشحونة بدون استخدام فترة طويلة. وتملح الألواح يعنى تكون طبقة صلبة من الكبريتات تمنع إتمام التفاعل الكيماوى . وإذا كان التملح بسيطاً فمن الممكن علاجه بشحن البطارية بتيار ضعيف يصل إلى عشر تيار الشحن العادى ثم تفريغها أيضا بنفس المعدل أما حالات التملح الشديد فلا علاج لها.
- 2- حدوث دوائر قصر بين الألواح ، ويحدث ذلك نتيجة للاتصال الداخلى بين الألواح الموجبة والسالبة، وعلاج ذلك يكون بغسل البطارية ثم شحنها، فإذا بقى القصر كما هو وجب تغييرها.
- 3- تلف البطارية نتيجة الشحن الزائد للبطارية والذى يؤدي إلى:
 - أ - زيادة كبيرة في كمية الماء المستهلكة في البطارية لأن الشحن الزائد يؤدي إلى زيادة درجة حرارة السائل وبالتالي إلى سرعة تبخره.
 - ب - زيادة التأكسد في الألواح الموجبة مما يؤدي إلى تمدد هذه الألواح.
 - ج - تملح الأطراف العلوية لألواح البطارية.

القسم الخامس بالمحطات

قسم الوقاية والتحكم

قسم التحكم فى أى محطة يمثل العقل المدبر للمحطة ، فتستطيع من خلاله فصل وتشغيل أى عنصر من عناصر المحطة ومعرفة حالته التشغيلية. ويوجد نوعان من أنظمة التحكم فى المحطات :

- نوع فى المحطات القديمة نستعرضه سريعا.
- ونوع ثان فى المحطات الحديثة يعرف بالـ Distribution Control Center, DCC أو Substation Automation System, SAS . وهذا ندرسه بالتفصيل.

فنظام التحكم فى المحطات القديمة والتقليدية يتمثل فى مجموعات من الخلايا تتواجد فى غرفة التحكم الرئيسية بالمحطة كما فى الشكل 3-16 :

- المجموعة الأولى من هذه الخلايا يظهر عليها مخطط SLD لمهام الجهد المرتفع (دوائر الدخول على المحطة والدوائر المتجه إلى جهة الجهد العالي فى المحول) وتظهر باللون الأزرق (جهد 132 ك) فى الصورة والتى يتضح منها أيضا أن نظام الـ BB الخاص بهذه المحطة من النوع Double BB .



Figure 16-3 غرفة التحكم فى المحطات التقليدية

- المجموعة الثانية من الخلايا (شكل 16-4) يظهر عليها مخطط مهمات الجهد المتوسط ، وتظهر باللون الأسود في جهد الـ 11kV . (هذه صورة للمؤلف في سنة 2005 أثناء تدريب ميداني لطلبته بالكويت)



Figure 16-4

وفى كلا الحالتين نجد داخل هذه الخلايا مجموعات من الـ Contactors والـ Bush Button متصلة بالعناصر المختلفة بالمحطة عن طريق كابلات من أجل التحكم فى فصلها وتشغيلها. والدائرة الخاصة بكل Feeder فى الصور السابقة مزودة بأجهزة قياس وأجهزة تحكم وأجهزة وقاية ومبينات أعطال (فإذا حدث عطل فى عنصر ما فإن مبین العطل الخاص بهذا العنصر يظهر ذلك من خلال إضاءة لمبة أو تغيير لونه) ومن هنا سميت هذه الغرفة بغرفة التحكم لأنك تستطيع أن تعرف وأنت بها حالة كل كابل دخول/خروج وهل هو موصل أم مفصول وما هو الحمل عليه ، الخ. وإمكانيات هذا النظام القديم محدودة ولا تتعدى ما ذكرناه. أما الأنظمة الحديثة فى التحكم فنستعرضها فى جزء لاحق.

- المجموعة الثالثة من الخلايا الموجودة فى غرفة التحكم التقليدية تضم أجهزة الوقاية الخاصة بحماية مغذيات الجهد العالي دخول / خروج بالإضافة إلى أجهزة الوقاية الخاصة بالمحول. وبعض تفاصيلها فى جزء تالى بعد عرض منظومة التحكم الحديثة.

16.2.1 نظام الإنذار فى المحطات التقليدية

وهو يتكون من خلية محلية للإنذار Local Alarm Panel تتصل بنظام الوقاية وباقي عناصر المحطة عن طريق دوائر الإنذار وهى مزودة بإشارات بيان ضوئية وإنذار صوتي وعندما تحدث أي ظاهرة غير عادية يعمل الجهاز.

ومن الإشارات الخاصة بنظام الوقاية ما يلي:

Protection Trip	اشتغال أحد أجهزة الوقاية
Protection Fault	تعطل أحد أجهزة الوقاية
D.C Failure	انقطاع التغذية بالتيار المستمر عن أي جهاز وقاية
Protection Under Test	وضع أي جهاز وقاية على وضع اختبار
Trip Circuit Faulty	وجود خلل بدائرة القطع بأحد القواطع

وذلك إضافة إلى الكثير من إشارات الإنذار الخاصة بالمحولات والخلايا الكهربائية وكل جزء في المحطة . وعند صدور أي من هذه الإشارات فإن نظام الإنذار يعمل وتضاء الإشارة الضوئية على خلية الإنذار بالمحطة مبينة نوع الخلل والعنصر الذي به الخلل وفي نفس الوقت ترسل نفس الإشارة إلى مركز التحكم المختص عن طريق نظام الاتصالات .

نظم التحكم الحديثة

(Substation Automation System)

نظم التحكم والوقاية فى محطات التحويل تطورت ومازالت تتطور بشكل مطرد خلال السنوات الأخيرة ، فقد تحولت نظم التحكم فى جميع المحطات الحديثة من نظم التحكم التقليدية (التى تعتمد على استخدام لوحات التحكم المزودة بمفاتيح يدوية Pushbuttons و Contactors متصلة بمهام المحطة عن طريق كابلات) إلى نظم تحكم تعتمد على نظم الاتصالات الرقمية الحديثة. وتسمى هذه النظم بالـ (Substation Automation Systems (SAS). تمثل الـ SAS عصب التحكم والوقاية لجميع مهام المحطة ، بل ويربط المحطة بنظام التحكم الإشرافى Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA).

ولا يقتصر دور الـ SAS على التحكم فقط ، بل يتم ربط جميع أجهزة الوقاية الرقمية والإنذارات والإشارات والبيانات الخاصة بكل مهمة فى المحطة ليتم عرضها والتحكم فيها من خلال أجهزة الحواسيب المخصصة داخل غرفة التحكم. والشكل 5-16 يبين صورة من غرفة التحكم بإحدى محطات التحويل (قارن هذه الصورة وإمكاناتها بالصورة الواردة فى الجزء السابق)



Figure 16-5 غرفة التحكم فى المحطات الحديثة

وفيما يلى نعرض بشئ من التفصيل للمصطلحات ووظائف الهيكل العام لنظام الـ SAS.

16.2.2 وظائف نظام الـ SAS

يشتمل نظام الـ SAS (شكل 16-6) على العناصر التالية:

- ✚ جهاز التحكم والمراقبة الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED).
- ✚ جهاز الوقاية الخاص بكل عنبر المسمى بـ Bay Protection Intelligent Electronic Device
- ✚ نظام Software Electrical Interlocking لكل المهمات الكهربائية بداخل وحدة التحكم للعنبر.
- ✚ أجهزة الحواسيب المخصصة للتحكم والمراقبة لجميع المهمات الكهربائية ، وهي معروفة باسم بـ Human Machine Interface (HMI).
- ✚ وتنقسم أجهزة الـ HMI إلى Operator's Workstation (OWS) و Engineering Workstation (EWS).
- ✚ شبكتي اتصالات (Ethernet) منفصلتين تماما تشكلا Redundant Local Area Network (LAN). تتكون الـ LAN من Ethernet Switches, Routers, Gateways, Optical-Fiber Cables, and Modems.
- ✚ أجهزة طرفية Terminal devices مثل الطابعات و شاشات العرض و لوحات المفاتيح وغيرها.
- ✚ نظام تزامن Global Positioning System (GPS) لربط جميع أجهزة الوقاية والتحكم بزمان موحد على مستوى الشبكة ككل.
- ✚ نظام تسجيل الأحداث التتابعي Sequential Event Recorder (SER) لتسجيل كل الأحداث والإشارات مثل فتح أو غلق أى دائرة و عمل أى جهاز من أجهزة الوقاية. ويتم طباعة هذه التقارير بشكل مستمر على طابعات مخصصة.
- ✚ نظام تسجيل الإنذارات Annunciation لتسجيل كل الإنذارات الحادثة مثل حدوث عطل فى أجهزة الوقاية أو انقطاع التغذية عنها أو حدوث أعطال وغيرها.
- ✚ أجهزة تسجيل الأعطال Transient Fault Recorder (TFR) والتي تقوم بتسجيل قيم الجهد والتيار بالإضافة إلى بعض الإشارات الرقمية الصادرة من أجهزة الوقاية بعد حدوث العطل. يتم الاحتفاظ بهذه البيانات لتحليلها بعد ذلك لمعرفة أسباب وملايسات العطل.
- ✚ تشتمل أيضا نظم الـ SAS على الوسائل اللازمة لربط المحطة بالـ SCADA.

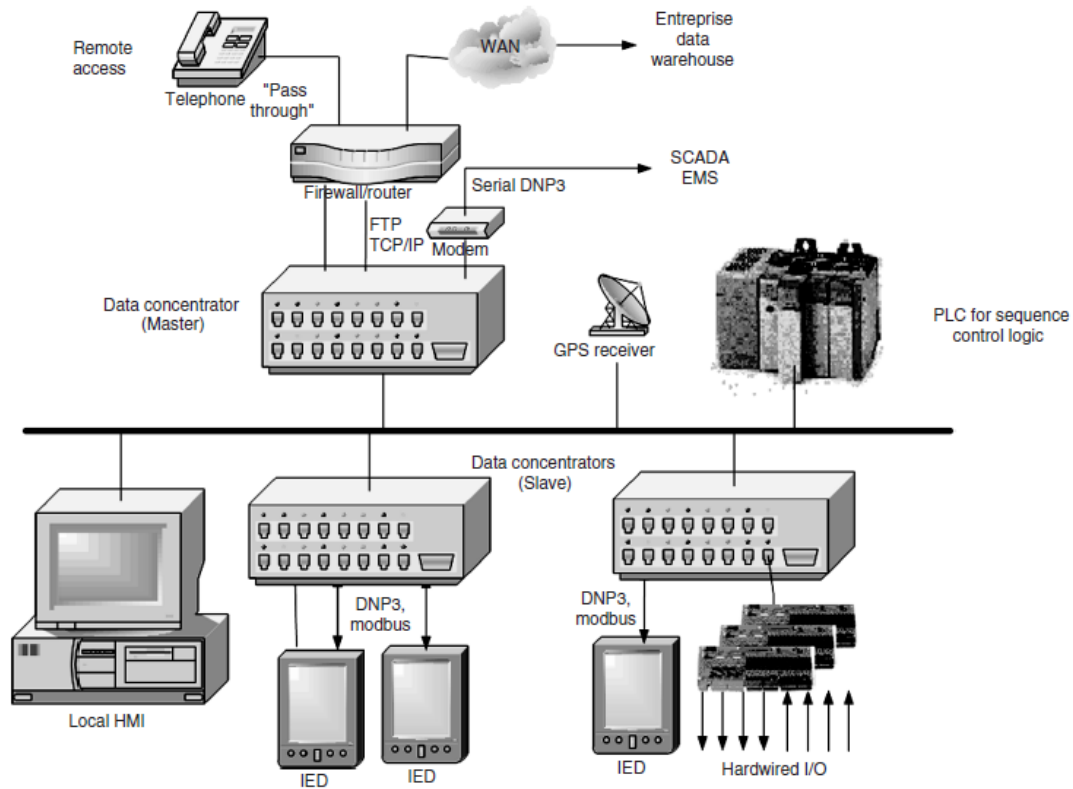


Figure 16-6 SAS

والشكل 16-7 يمثل الشكل العام لنظام الـ SAS.

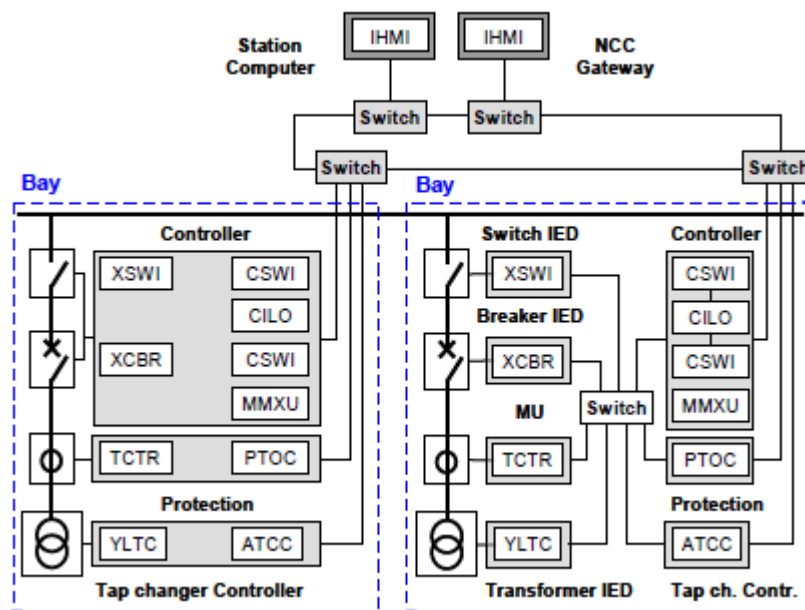


Figure 16-7 SAS

16.2.3 مقارنة بين التحكم في المحطات التقليدية والمحطات الحديثة

لنأخذ مثالا بسيطا لنبين به مدى التوفير ومقدار رفع الكفاءة وقدر التقليل في تكاليف التشغيل والصيانة في المحطات الحديثة مقارنة بالمحطات التقليدية.

في المحطة التقليدية يكون لكل معدة كهربية سواء كانت (مغذى - محول - رابط القضبان) عدد ثلاث خلايا في مبنى التحكم للمحطة:

- 1- خلية وقاية
- 2- خلية تشغيل ومراقبة
- 3- خلية قياس ومراقبة

كذلك تركيب أجهزة وحدات طرفية Remote Terminal Unit RTU لتجميع المعلومات من معدات المحطة وتبادل تلك المعلومات مع مراكز التحكم، وال RTU عبارة عن جهاز إلكتروني ذكي يمكن تركيبه في مكان بعيد لكي يعمل كنقطة نهاية للـ field contact ويستخدم زوج من الوصلات النحاسية لكي يشعر ويراقب كل contact & transducer ومنها أنواع توضع في مراكز التحكم كأجهزة إرسال وإستقبال للإشارات ، و منها ما يوضع في المحطات.

أما في المحطات الحديثة فقد تجمعت كل تلك الوظائف في جهاز الوقاية الرقمي IED ، اذ أنه يؤدي مهمة الوقاية وكذلك يؤدي مهمة القياس للفتول والتيار وبحسب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة ويمكنه حساب أى معلومة أخرى بدلالة الجهد والتيار وزاوية الطور بينهما والزمن مثل احتساب استهلاك الطاقة. كذلك يؤدي مهام التشغيل للمعدات من فصل وتوصيل القاطع الكهربى وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى.

وفي المحطات التقليدية سواء كانت AIS أو GIS فإنه يلزم كمية كبيرة من الكابلات للربط بينها وبين غرفة التحكم للمحطة ، وهذه الكابلات تستخدم لتوصيل خلايا التشغيل وخلايا المراقبة وخلايا الوقاية لكل معدة كهربية بمعدات الفصل والتوصيل ومعدات استشعار الجهد (محول الجهد) ، ومعدات استشعار التيار (محول التيار).

فعلى سبيل المثال لا الحصر يوصل من القاطع الكهربى عددا من الملامسات المساعدة (Auxiliary contacts) لخلايا التشغيل منها ملاس لبيان حالة القاطع (موصل أو مفصول) ، وعدد آخر من الـ Contacts تستخدم كشرط لإمكانية توصيل أو منع التوصيل (Interlock) للقاطع الكهربى والسكاكين التي لها علاقة به ، وعدد آخر من الـ Contacts لخلايا أجهزة الوقاية اللازمة للقيام بمهمة الوقاية. ونفس العدد من الـ Contacts أو أكثر لكل سكينة توصيل وكل سكينة أرضى لنفس الوظائف ، كذلك يوصل من محولات التيار كابلات لتوصيل الملفات الثانوية إلى خلايا أجهزة الوقاية وخلايا القياس والمراقبة وأيضا كابلات لتوصيل الملفات الثانوية لمحولات الجهد إلى نفس الخلايا.

كذلك يتم توصيل كابلات تخص التشغيل من غرفة التحكم لإتمام عملية التوصيل والفصل سواء العادي أو نتيجة لحدوث خطأ. و يلاحظ أن كمية الكابلات المطلوبة هائلة حتى يمكن التشغيل والتحكم من غرفة تحكم المحطة.

أما في المحطات الذكية فالوضع يختلف تماما لسببين:

- أولا : تركيب أجهزة الوقاية الرقمية إما في السويتشجير مباشرة أو في غرفة أقرب ما تكون إليها وفي هذه الحالة فإن طول الكابلات سوف يكون قليلا جدا بالمقارنة بتوصيلها إلى غرفة التحكم.
- ثانيا : يتم توصيل ملامس مساعد auxiliary contact واحد أو اثنين على الأكثر من كل من القاطع الكهربائي وسكاكين التوصيل وسكاكين الأرضى وكذلك ثلاثة أو أربعة أسلاك توصل من الملفات الثانوية من محولات الجهد وأخرى من محولات والتيار إلى أجهزة الوقاية الرقمية مرة واحدة وفي هذه الحالة فإن كمية الكابلات سوف تكون قليلة جدا بالمقارنة بالنظام التقليدي .

وبالتالى فقد أدت نظم الـ SAS إلى كثير من المميزات مقارنة بنظم التحكم التقليدية أهمها كما ذكرنا توفير عدد كبير من كابلات التحكم حيث تم إستبدالها ببرامج وخوارزميات تكتب داخل أجهزة الـ IEDs. وهذا بدوره يؤدي إلى قلة احتمالية حدوث أعطال أو قطع في شبكات كابلات التحكم داخل المحطة وبالتالي زيادة نسبة الاعتمادية لنظم التحكم والوقاية.

وفي الجزء التالى نتعرف على الهيكل الهرمى لنظام التحكم وآليات تنفيذه بشكل مبسط.

16.2.4 هيكل التحكم فى نظام الـ SAS

ينقسم هيكل التحكم فى نظام الـ SAS إلى خمسة مستويات:

OFF Mode

وفيه لا يمكن التحكم فى المهمة الكهربائية الخاصة بالعنبر من أى مستوى سواء من داخل أو خارج المحطة.

Emergency Mode

وفيه يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق أجهزة التحكم اليدوية الموجودة فى العنبر ذاته كما هو الحال فى المحطات ذات نظم التحكم التقليدية. ويستخدم هذا النمط من انماط التحكم فى حالة حدوث أعطال أو صيانة فى كل أو بعض من أجهزة نظام الـ SAS.

Local (BCU) Mode

وفى هذا النمط يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق الـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED).

Remote (Station Level) Mode

وفيه يتم التحكم فى مهمات العنبر عن طريق أجهزة الحواسيب سواء الـ Operator's Workstations (OWS) أو الـ Engineering Workstations (EWS). ومن الجدير بالذكر أن الأوامر التى يتم إصدارها من الـ OWS أو الـ EWS تنتقل عبر شبكة الاتصالات (LAN) إلى الـ Bay Control Intelligent Electronic Device (IED) والتى تقوم بدورها بتمرير الأوامر إلى المهمات الكهربائية من خلال أسلاك التوصيل.

Remote (Supervisory Level) Mode

وفي هذا النمط يتم التحكم في مهمات العنبر عن طريق نظام الـ SCADA من خلال مراكز التحكم الإقليمية والقومية. وكما هو الحال في النمط السابق ، فإن الأوامر التي يتم إصدارها من الـ OWS أو الـ EWS تنتقل عبر شبكة الاتصالات (WAN and LAN) إلى الـ (Bay Control Intelligent Electronic Device (IED). والشكل 16-8 يلخص هيكل التحكم الهرمي في نظام الـ SAS.

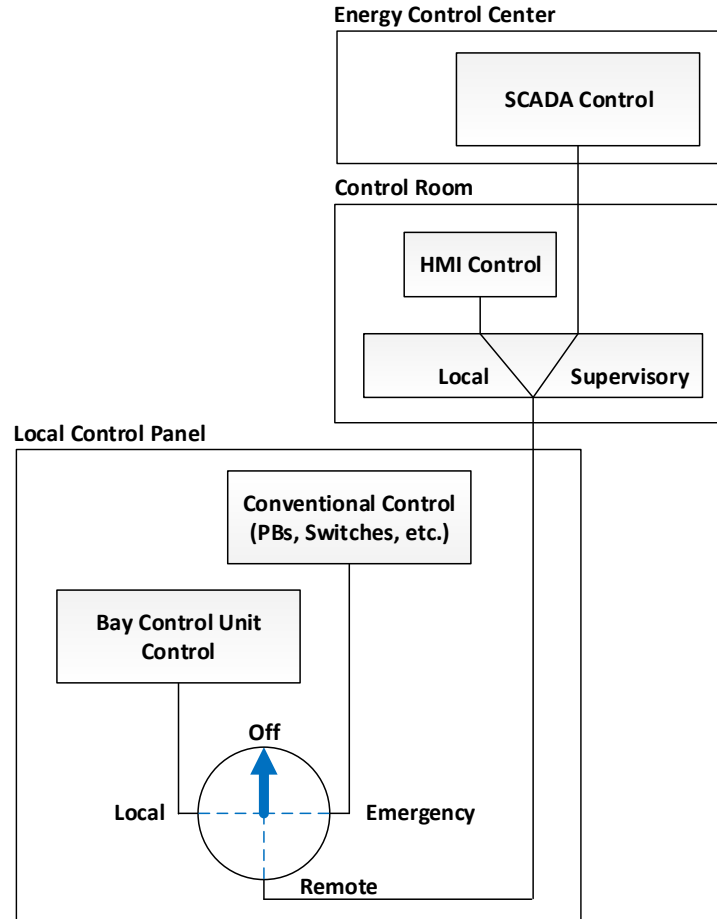


Figure 16-8

هيكل التحكم الهرمي في نظام الـ SAS

وبعد التعرف بشكل مبسط على الهيكل العام لأنماط التحكم في نظام الـ SAS ، يجدر ذكر أن الجمعية الدولية الكهروتقنية (IEC) قامت بوضع مواصفة عالمية تضبط تصميم ونمذجة نظم الاتصال داخل شبكات نظام الـ SAS تحت مواصفة رقم IEC-61850.

منظومات الوقاية الكهربائية فى محطات التحويل

Protective Schemes

توجد داخل محطات التحويل جميع أجهزة الوقاية الخاصة بحماية عناصر الشبكة الكهربائية مثل خطوط النقل والمحولات وقضبان التوزيع وال Reactors وخلافه.

وكل عنصر من هذه العناصر له منظومة حماية تتكون من عدة أجهزة وقاية بالإضافة إلى القواطع وأجهزة الـ CT and VT الخاصة بهذا العنصر. وكل هذه المنظومة توضع داخل محطات التحويل فى غرفة التحكم كما فى الصورة شكل 9-16.

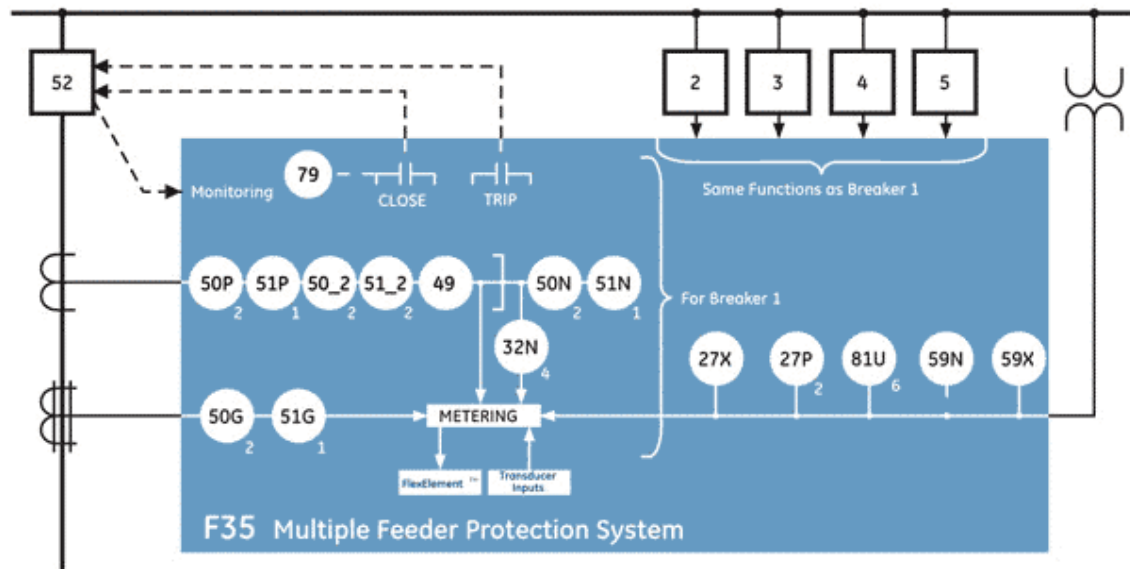


Figure 16-9 Digital Relays

وفى هذا الجزء لن نشرح أداء هذه المنظومة ولن نشرح مكوناتها فهذا يمكن الرجوع إليه فى كتاب نظم الحماية الكهربائية ، وسنكتفى فقط بوضع نموذجين لمخططات منظومة الوقاية لأحد المغذيات (شكل 10-16) ، ومنظومة الوقاية للمحول (شكل 11-16) ، حيث يظهر على المخطط فقط أرقام أجهزة الوقاية المستخدمة فى حماية هذا العنصر . والأمثلة مأخوذة من كتالوج إحدى الشركات المصنعة لأجهزة الوقاية الرقمية.

16.2.5 نموذج منظومة حماية أحد المغذيات

The F35 feeder protection system provides feeder protection, control, monitoring and metering in an integrated, economical, and compact package.



ANSI Device Numbers & Functions

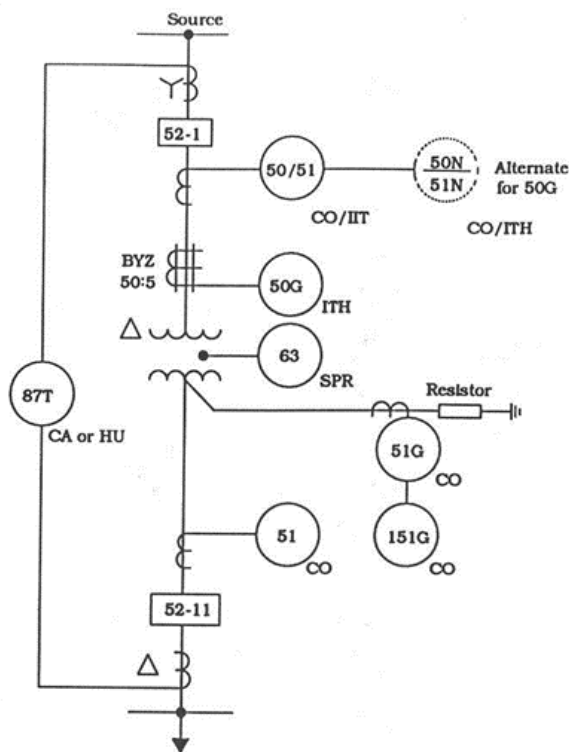
Device Number	Function	Device Number	Function
27P	Phase Undervoltage	51N	Neutral Time Overcurrent
27X	Auxiliary Undervoltage	51P	Phase Time Overcurrent
32N	Wattmettric Zero Sequence Directional	51_2	Negative Sequence Time Overcurrent
49	Thermal Overload	52	AC Circuit Breaker
50G	Ground Instantaneous Overcurrent	59N	Neutral Overvoltage
50N	Neutral Instantaneous Overcurrent	59X	Auxiliary Overvoltage
50P	Phase Instantaneous Overcurrent	79	Automatic Recloser
50_2	Negative Sequence Instantaneous Overcurrent	81	Underfrequency
51G	Ground Time Overcurrent		

Figure 16-10 Feeder Protective Scheme

16.2.6 نموذج لمنظومة حماية المحول

The T60 transformer protection system is a comprehensive three-phase transformer relay designed to protect medium and large power transformers.

- Dual-slope, dual-breakpoint differential restraint characteristic, restrained and unrestrained differential
- 2nd harmonic inrush and over excitation inhibit
- Transformer over excitation protection
- Restricted ground fault
- Loss-of-life, aging factor, hottest spot
- Five zones backup distance protection with power swing detection and load encroachment function
- Synchro check, ROCOF, over and under frequency



ANSI Device Numbers & Functions

Device Number	Function
21P	Phase Distance
21G	Ground Distance
24	Volts Per Hertz
25	Synchrocheck
27P	Phase Undervoltage
27X	Auxiliary Undervoltage
49	Thermal Overload
50BF	Breaker Failure
50G	Ground Instantaneous Overcurrent
50N	Neutral Instantaneous Overcurrent
50P	Phase Instantaneous Overcurrent
50/87	Instantaneous Differential Overcurrent
51G	Ground Time Overcurrent
51N	Neutral Time Overcurrent
51P	Phase Time Overcurrent
59N	Neutral Overvoltage
59P	Phase Overvoltage
59X	Auxiliary Overvoltage
67N	Neutral Directional Overcurrent
67P	Phase Directional Overcurrent
68	Power Swing Blocking
78	Out-of-Step Tripping
81O	Overfrequency
81U	Underfrequency
81R	Rate of Change of Frequency (ROCOF)
87G	Restricted Ground Fault
87T	Transformer Differential

Figure 16-11 Transformer Protective Scheme

القسم السادس بالمحطات

وسائل الاتصالات بمحطات التحويل

تعتبر الاتصالات وسيطاً لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، و نلاحظ أن أجهزة الاتصال جزء منها في المحطات والجزء الآخر في مركز توزيع الأحمال. وتنقسم وسائط الاتصال المختلفة المستخدمة للربط بين المحطات إلى عدة وسائط أهمها:

16.2.7 الاتصال عن طريق خطوط الضغط العالي : PLC

ولكى يمكن استخدام هذه الطريقة وتسمى Power Line Carrier, PLC في نقل المعلومات لابد من توفر جهاز PLC في المحطة وآخر في المركز ، حيث يتم استقبال المعلومات المختلفة القادمة من وحدة RTU على شكل إشارات رقمية (Digital) بواسطة جهاز Modem ، وهذا الجهاز يقوم بتحويلها إلى إشارات (Analog) ذات تردد منخفض يعرف بالتردد الصوتي (Voice Frequency, VF) كمرحلة أولى ، ثم يقوم بعد ذلك بتمريرها إلى الـ PLC من خلال كارت داخل هذا الجهاز يُعَدِّل تردد الموجة إلى تردد متوسط (Intermediate Frequency, IF)، ثم في المرحلة النهائية يتم تعديل تردد الموجة إلى التردد العالي (HF) المراد إرسالها عليه .

وفي الجزء الأخير من هذه العملية يتم تكبير الإشارة وإعطائها كمية من الطاقة بواسطة Power Amplifier ، حتى يمكن إرسالها على خطوط الجهد العالي (500 ك.ف أو 220 ك.ف) الموجودة على البرج ، مع ملاحظة أنه لن يحصل تداخل بين المعلومات المتعلقة بالاتصالات وبين الطاقة المنقولة على نفس الخط وذلك لأن تردد الشبكة هو (50 هيرتز) بينما تردد الاتصالات يكون ما بين (20 إلى 500 كيلوهيرتز) .

ونلاحظ أن تعديل الموجة تم على مراحل ، وذلك لكي لا يحصل تشوه كبير في الموجة أثناء التعديل من خلال مرحلة واحدة وبالتالي لا نفقد أية معلومات.

ما أن تصل الموجات المرسلّة على خطوط الجهد العالي إلى محطة أخرى أو إلى مركز تحكم LDC حتى يستقبلها صائد الموجات Wave Trap حيث يعمل صائد الموجات على التقاط موجات الاتصالات من خط القوى و تمريرها إلى داخل المركز حيث يكون في استقبالها جهاز PLC الثانى الذى يعمل على تعديل تردد الموجة من التردد العالي (HF) إلى التردد المتوسط (IF) ، ثم تعديل التردد المتوسط إلى الصوتي (VF) ، ثم يقوم بتمريرها إلى جهاز Modem يقوم بإزالة تضمين الموجة وتحويلها من Analog إلى Digital ، ومن ثم تحويلها إلى جهاز Tag Control Information, TCI الذي يقوم بمعالجتها وإرسالها إلى أجهزة الحاسب الإلي .

وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بعدم وجود تمديدات وأسلاك خاصة بالاتصالات لأن النقل يتم من خلال خطوط الضغط العالي الممددة أصلاً لنقل الطاقة.

نلاحظ أن البيانات و المعلومات سواء كانت مُرسلة أو مُستقبلة يتم نقلها على نفس الخط ولكن بتردد مختلف لكي لا يحصل بينها تداخل . كما يقوم الجهاز بتشغيل قناة واحدة إذا كانت المعلومات التي يتعامل معها قليلة أو قناتين عند كثرة المعلومات.

16.2.8 دوائر مصيدة الترددات على الخطوط Line Trap

وهذه تكون في مدخل المحطة ومن أوائل المكونات فيها ، وتكون موصلة على التوالي مع موصلات خط الدخول وهى عبارة عن Inductor بقيم تيار مقننة عالية تصل إلى 2000 أمبير وتكون الـ Inductance ما بين 0.1-2 mH ، والغرض منها استقبال الإشارات القادمة من المحطات الأخرى الخارجية ، وهى عادة إشارات خاصة بأجهزة الوقاية غالبا أو إشارات من مركز التحكم بغرض فصل وتوصيل خطوط أو محولات بالمحطة فتسمح هذه الدوائر بمرور التيارات ذات التردد 50 هيرتز وتحجز الترددات العالية فى دائرة أخرى متصلة بجهاز الاستقبال



Receiver. وتظهر دائما كاسطوانات معلقة كما فى الشكل 12-16. وتوصل مصيدة الذبذبات على التوالي مع خط الضغط العالي وتوصل فى الغالب على فارة واحدة فقط .

Figure 16-12 Wave Traps

ملحوظة:

هذه الترددات العالية تكون بالطبع أعلى من الترددات (العالية) التى يمكن أن تتواجد فى الإشارة أثناء العطل وتكون غالبا فى مدى 4 إلى 11 ميغا هيرتز وهذا المدى لا يظهر فى إشارات الأعطال.

وتعتمد فكرة عمل هذه المعدات على كونها (RLC circuits) و يتم ضبط Resonance Frequency لـ Line Trap بحيث تصبح معاوقتها عند الـ 50 Hz تساوى صفرا وبالتالي تقوم بإمرار تردد الشبكة -50 Hz مع تحقيقها لمعاوقة كبيرة لمرور الترددات المرتفعة والتي تجد الـ Coupling Capacitor معاوقته صغيرة جدا فتدخل من خلاله إلى جهاز الاستقبال عبر الـ Line Tuner كما فى الشكل 13-16.

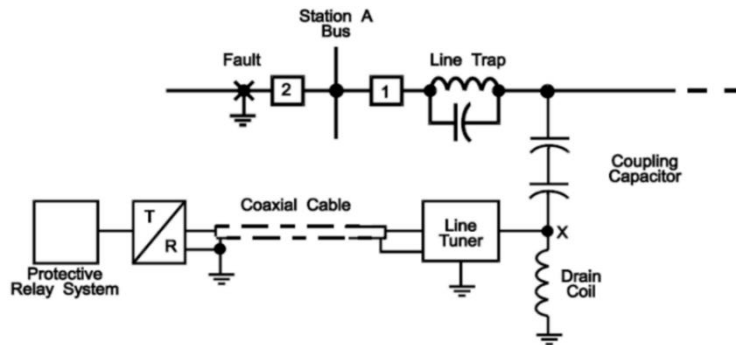


Figure 16-13 مكونات مصيدة الموجات

16.2.9 الاتصالات عن طريق Pilot Cable :

وتعرف أيضا بالكابلات الأرضية ، وذلك لأنها عبارة عن كابلات خاصة بالاتصالات يتم تمديدها تحت الأرض بين المحطات و بين الـ LDC.

و يتم تركيب جهاز Modem في المحطات بحيث يستقبل الإشارات الرقمية القادمة من RTU ثم يقوم بتحويلها إلى Analog ، ثم منه إلى Pilot Cable الذي ينقلها بدوره إلى المركز ، حيث يستقبلها جهاز Modem آخر يقوم بتحويلها من Analog إلى Digital ومنه إلى Tag Control Information, TCI

16.2.10الاتصال عبر الألياف البصرية: Fiber Optic , FO

يتم تمديد الألياف البصرية بين المحطات المختلفة و مركز توزيع الأحمال وذلك بحيث تحتوي المحطات على أجهزة خاصة بالاتصال عن طريق الألياف البصرية وتتميز هذه الطريقة في نقل المعلومات بكونها سريعة جداً وتنقل كمية كبيرة من البيانات وقليلة الأعطال نوعاً ما

و يستقبل جهاز (FO) الإشارات الرقمية من الـ RTU و من أجهزة أخرى حتى وإن كانت Analog ، ثم يقوم بتحويلها إلى إشارات ضوئية وإرسالها من خلال الألياف البصرية إلى المركز حيث يكون في استقبالها جهاز آخر يقوم بتحويل الإشارات الضوئية إلى Digital أو Analog ومن ثم نقلها إلى . TCI

16.2.11الاتصالات اللاسلكية : Wireless

وتتكون شبكة الاتصالات اللاسلكية من عدة أجهزة أهمها:

1- الأبراج: Towers

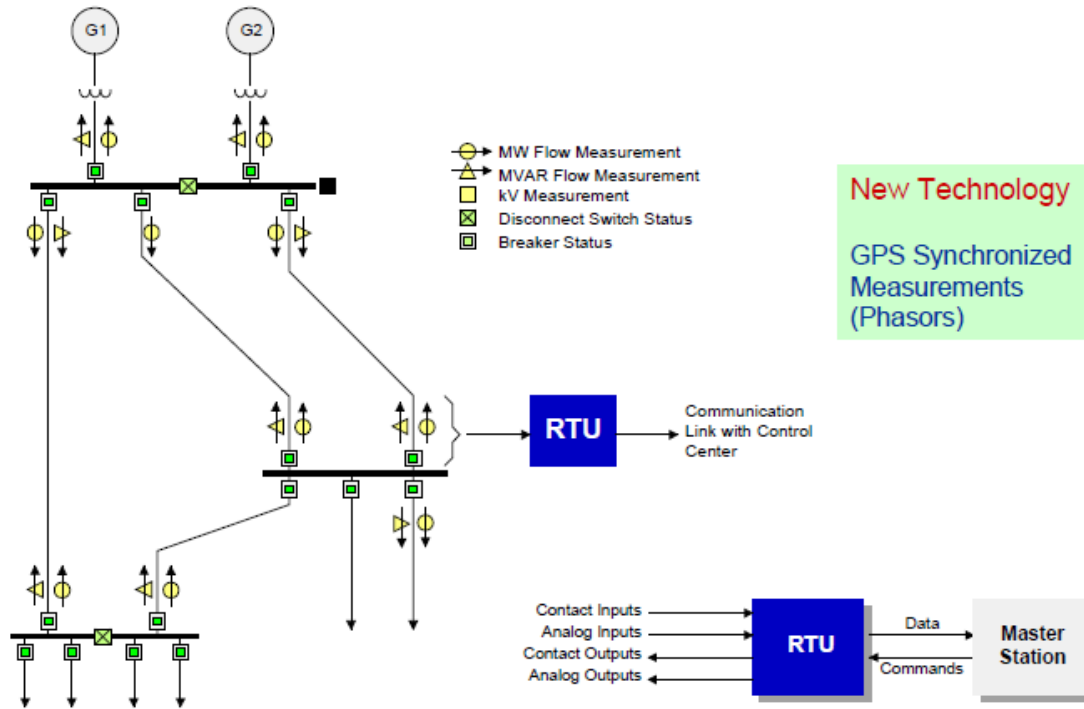
تعتبر الأبراج ذات أهمية قصوى في أي شبكة لاسلكي فهي تحمل هوائيات الاتصال ، ويتم توزيع الأبراج بشكل مدروس لكي تشمل جميع المناطق المراد تغطيتها بالشبكة. وأهم عيوب هذه الوسيلة أن هوائيات الأبراج لابد أن تكون في مدى الـ Line of Sight بمعنى أن ترى بعضها بعضا ، وهذا هو السبب في أن أبراج الاتصالات دائما تكون مرتفعة أو فوق مباني مرتفعة. وإلا ستضعف الإشارة ونحتاج إلى المكبرات أو الـ Repeaters .

2- جهاز . Repeater

يقوم هذا الجهاز باستقبال الإشارات من الأجهزة اللاسلكية المختلفة ثم يقوم بتكبيرها (أي تكبير ترددها) وإعادة إرسالها مرة أخرى ، وذلك لكي تنتقل الإشارات إلى مسافات بعيدة وبالتالي يكون نطاق عمل اللاسلكي أكبر . ويتحكم الجهاز في (6) قنوات كحد أقصى ويقوم بتشغيلها وتكون هذه القنوات على ترددات مختلفة لكي لا يحصل بينها تداخل. ويتم تغذيته بتيار متردد AC ، وفي حالة انقطاع هذا المصدر توجد بطاريات DC تعمل

فور انقطاع المصدر الأصلي وذلك لضمان استمرار خدمة اللاسلكي على الدوام.

نشير هنا إلى أنه عند توصيل وتمديد أحد الطرق السابقة لا يتم ذلك مباشرة من كل محطة إلى المركز بالضرورة ، بل قد يمر الخط بعدة محطات في طريقه قبل أن يصل إلى المركز حاملاً معه بيانات كل محطة على حدة لإيصالها إلى المركز أو العكس.



القسم السابع بالمحطات

نظم الوقاية من الحريق فى المحطات

الغرض من نظام الإطفاء هو حماية العاملين والمعدات والأجهزة من الحريق . وكما نعلم فإنه لكي يحدث الإشتعال فلا بد من توافر المادة القابلة للاشتعال والحرارة والأكسجين (مثلث الحريق شكل 14-16) ، وذلك في مكان واحد وزمان واحد . ولإطفاء الحريق نحتاج لكسر ضلع واحد على الأقل من أضلاع هذا المثلث.



Figure 16-14

و نظام الوقاية من الحريق الذي نحن بصدده يتضمن النظام الثابت ولا نقصد أنظمة الوقاية المحمولة (الطفايات) .

16.3 مصادر الخطورة فى المحطات

حدوث حريق بالمحطة غالبا يكون بسبب من الأسباب التالية:

- الكابلات هي مصدر الخطورة الأساسي في المحطات الكهربائية حيث يمثل مزيج من المواد القابلة للاشتعال ومصدر للشرارة ، حدوث خطأ في أحد الكابلات يمكن أن يسبب درجة كافية لاشتعال العازل واحداث حريق.
- ومن مصادر الخطورة أيضا الأجهزة المعزولة بالزيت كالمحول أو قاطع الدائرة في قابلية الزيت للاشتعال عند حدوث خطأ كهربائي داخل الجهاز ، كما يعتبر تسرب الماء داخل الأجهزة أو حدوث خطأ في الجسم العازل من أسباب حدوث الشرارة وحدوث الحريق.
- ومن مصادر الخطورة في بعض المحطات الكهربائية مولدات الديزل وضغط الهواء لما تحتويه من مواد قابلة للاشتعال مع الشرارة.

16.3.1 نظرية الإطفاء

تعتمد فكرة نظرية إطفاء الحريق بمحطات المحولات على إفساد نسبة الأكسجين عند بدء الاشتعال وذلك :

- 1- باستخدام مادة مخمدة ، مثل غاز ثاني أكسيد الكربون ، أو بخار الماء (أو رذاذ المياه) ، مما يقلل نسبة الأكسجين عن الحد اللازم لاستمرار الاشتعال (حوالي 10 %) وكذلك يسبب إزاحة الأكسجين عن الجسم المحترق . بسبب اختلاف كثافة المادة المخمدة والهواء مما يؤدي إلى توقف الاشتعال.

2- أحكام إغلاق جميع الفتحات والأبواب في الغرفة التي بها الحريق ، بحيث لا يسمح بدخول الهواء إليها ، وغالبا تترك فتحات صغيرة علوية لخروج الهواء .

16.4 مكونات نظام الإطفاء الثابت :

نظام الإطفاء عبارة عن نظام يركب في المواقع المراد حمايتها ويعمل تلقائيا . ويتكون من واحد أو أكثر من الأنظمة التالية:

- أنظمة المرشات المائية
- أنظمة ثاني أكسيد الكربون
- أنظمة الهالون وبدائله.
- ولكل واحد منها مميزات وعيوبه.

ويتكون كل نظام إطفاء من:

- عنصر الإطفاء
- صمام التحكم
- نظام التوزيع
- أجهزة الكشف والتحكم
- صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (deluge valves) ،
- بالإضافة إلى مواسير قادرة على إيصال عنصر الإطفاء (ماء/CO₂) بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان الحريق كما في الشكل 15-16.

عنصر الإطفاء :

يمكن أن يكون هذا العنصر ماء مخزن في خزان للمياه أو من أى مصدر طبيعي للماء . ويستخدم في بعض المحطات نظام ثاني أكسيد الكربون.

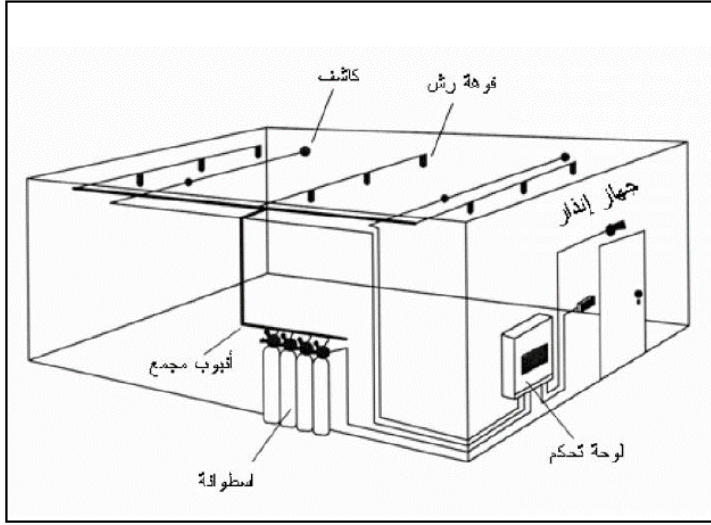


Figure 16-15 مكونات نظام الاطفاء الثابت

صمام التحكم :

صمامات التحكم النموذجية هي صمامات الرش (sprinklers valves) أو صمامات الغمر (Deluge valves) .

نظام التوزيع :

يتكون من مواسير ومنافذ قادرة على إيصال عنصر الإطفاء بالشكل المطلوب والكمية المطلوبة إلى مكان الحريق.

أجهزة التحكم والكشف عن الحريق :

هي عبارة عن أجهزة كهروميكانيكية مجهزة بحساسات (sensors) قادرة على اكتشاف الحريق في مراحل مبكرة جداً ، أى في بداياته وإرسال إشارات إلى أجهزة الإنذار والتحكم تشغيل في نظام الإطفاء.

16.4.1 آلية الإطفاء

يتم إطفاء الحريق أما يدويا (طفايات) أو آليا ، وسوف نتحدث في هذا الجزء عن إطفاء الحريق آليا ، حيث تعتمد الفكرة الأساسية على تركيب رؤوس مكتشفة للارتفاع في درجة الحرارة المحيطة بالمحول ، وعند وصولها إلى الحد الخطر تبدأ في إعطاء إشارة بوجود حريق ، كما تعمل في نفس الوقت على إطلاق الوسط الذي سيتم إطفاء الحريق به ، ويختلف هذا الوسط على حسب نوع تركيب المحول ، هل هو داخل المبنى أو خارجه.

فإذا كان المحول مركباً داخل المبنى يتم استخدام غاز ثاني أكسيد الكربون وهو يمتاز بأنه غاز خامل لا يساعد على الاشتعال ، ولا يشتعل وأثقل من الهواء ، كما يمكن استخدام الهالون ، وهو غاز لا يساعد على التآكل وغير موصل ، يقوم إذا ما تواجد بتركيز يبلغ حجمه 5% بإطفاء الحريق بواسطة تفاعل كيميائي ، حيث يتفاعل مع ناتج الاحتراق المسئول من انتشار اللهب بسرعة ، كما ينهي التفاعل المتسلسل للاحتراق ، ويتميز غاز الهالون بأنه أسرع في إطفاء الحريق من غاز ثاني أكسيد الكربون.

أما إذا كان المحول مركباً خارج المبنى أو في حجرات غير مغلقة من جميع الجوانب ، فإنه يتم استخدام مياه مدفوعة تحت ضغط ، وغالباً تكون مثل الرذاذ ، فيؤدي استخدامها إلى خفض درجة حرارة المحول المشتعل عن درجة حرارة اشتعاله ، نتيجة مشاركة واقتسام المياه للحرارة المتولدة عن الحريق.

16.5 أنواع أنظمة إطفاء الحريق

16.5.1 الماء تحت ضغط الهواء

في محطات المحولات نستخدم هذا النظام الشائع لحماية المواقع التي بها محولات مملوءة بالزيت ، في هذا النظام يستخدم كمية كبيرة من الماء المخزن في خزانات خاصة تحت ضغط لإطفاء الحريق وهذا الماء يدفع إلى الـ Sprinklers بمساعدة الهواء المضغوط. أيضاً يستخدم الهواء المضغوط للكشف عن الحرائق وللتحكم في خروج الماء إلى المكان الذي به الحريق.

من مميزات هذا النظام أنه من السهل إعادته إلى الخدمة بسرعة بعد إطفاء الحريق وأيضاً رخص ثمن المادة المستخدمة في الإطفاء وهي (الماء)

ومن عيوب هذا النظام تعرض الخزان للصدأ . وفي حالة عدم إخماد الحريق واستنفاد كمية الماء الموجودة في الخزان فإن الهواء المنفد من النظام يساعد على زيادة الحريق.

16.5.2 نظام ثاني أكسيد الكربون



Figure 16-16 اسطوانات ثاني أكسيد الكربون

نظام مكافحة الحريق باستخدام غاز ثاني أكسيد الكربون ذو تأثير فعال في إطفاء الحرائق دون ترك آثار ضارة بالمعدات الموجودة. يتميز غاز ثاني أكسيد الكربون أنه لا يشتعل ولا يساعد على الاشتعال ، وأنه أثقل من الهواء بحوالي مرة ونصف ، فيتراكم على سطح المواد المشتعلة مانعا وصول أكسجين الهواء لمصدر النار. وحيث أن درجة حرارة غاز CO_2 منخفضة جدا ، وبالتالي فإنه يعمل على تبريد المادة المشتعلة

كمية الغاز المستخدمة لإطفاء الحريق تعتمد على حجم المكان أو الحجرة الموجود بها المحول ، فيحتاج كل متر مكعب إلى 2 كجم من غاز ثاني أكسيد الكربون.

ويخزن ثاني أكسيد الكربون في اسطوانات مضغوطة كما في الشكل 16-16 ، وتستخدم اسطوانة صغيرة من ثاني أكسيد الكربون للتحكم في تمرير ثاني أكسيد الكربون من الاسطوانات الكبيرة.

من عيوب هذا النظام في حالة حدوث تسريب للغاز داخل الحجرة فيمكن أن يؤدي ذلك إلى حدوث اختناق للأفراد

ملحوظة:

عند تفريغ غاز CO_2 يجب أن تغلق جميع الأبواب و الشبابيك ولكن تترك فتحات في أعلى الحجرة لخروج الهواء كما يجب تشغيل إنذار صوتي (يعمل أتوماتيكيا عند حدوث الحريق) لتنبيه العاملين بحدوث حريق .

يلاحظ أنه يوجد تأخير زمني (من 1-24 ثانية) من لحظة تشغيل الإنذار ، وحتى انطلاق الغاز لكي يمكن إخلاء المكان من الأشخاص وغلق الأبواب . وبعد انتهاء إطفاء الحريق يجب مراعاة عدم دخول غرفة المحول قبل عمل التهوية الكافية .

16.5.3 نظام الماء تحت ضغط ثاني أكسيد الكربون

هذا النظام يشبه نظام الماء تحت ضغط الهواء ولكن تم استبدال الهواء المضغوط بثاني أكسيد الكربون لدفع الماء من الخزان خلال المواسير إلى الرشاشات الرزازية . وغاز ثاني أكسيد الكربون المستخدم يخزن في اسطوانتين أو أكثر ، ويستخدم نظامان للكشف عن الحريق ، ولكي يمر الغاز من الاسطوانة الكبيرة ويخرج الماء لابد من أن يعمل كلا من نظامي الكشف معا وفي حالة عدم شعور أحدهما بالحريق فلن يعمل النظام.

من مميزات هذا النظام عدم صدأ الخزان , وإذا لم تتم عملية الإطفاء بعد انتهاء كمية الماء فإن الغاز الذي يخرج بعد الماء لا يزيد من الإشتعال كما في حالة الهواء .

لكن من عيوب هذا النظام أنه في حالة عدم وجود اسطوانات احتياطية أو استبدال الاسطوانات الفارغة بسرعة بعد عملية التشغيل سوف يكون المكان المراد حمايته بدون حماية بالإضافة إلى أن غاز ثاني أكسيد الكربون غالى الثمن .

16.5.4 نظام الإطفاء برشاشات الماء لحماية المحول:



Figure 16-17

توضع الرشاشات حول المحول (شكل 16-17) وهذه الرشاشات مثبتة على مجموعة من المواسير تحيط بالمحول الأمر الذي يجعل الماء الخارج منها يغمر المحول من جميع الجوانب وعندما يشعر الحساس بدرجة الحريق فإن مفتاح الضغط يرسل إشارة ليعمل جهاز الإنذار بغرفة التحكم . وفي نفس الوقت يتم فتح صمام التحكم عن بعد آليا خلال ثواني ويبدأ في إطفاء الحريق .

وبما أن الماء أهم عامل مؤثر في عملية الحريق لذلك فإن الماء لابد أن يكون مجهزا طوال الوقت بالكمية المناسبة وبالضغط المناسب . لذلك لا نستطيع أن نضع نظام وقاية الحريق على مصدر

المياه التابع لمرفق مياه المدينة ، ولكن يجب وجود خزان مياه مملوء بالماء ومزود بضغوط هواء (يصل ضغط الهواء من 10-15 بار داخل خزان المياه) وذلك من أجل أن يخرج الماء على شكل غمامة فيساهم أيضا في خنق الحريق).

ملحق الباب الثالث

تعليمات التشغيل الخاصة بمحطات المحولات

فيما يلي نموذج من إحدى محطات التحويل 11/66 ك ف بمصر تشتمل على التعليمات الموجهة للسادة رؤساء محطات المحولات والسادة فنيي المحطات للتشغيل (النموذج المقدم لتنسيق العمل بين تحكم طلخا (تحكم اقليمي رئيسي) وتحكم شركة التوزيع):

- اتباع تعليمات الأمن الصناعي أثناء فصل المحطة بالكامل وأثناء ظروف التشغيل العادية وكذلك فصل أي مهمة من مهمات المحطة جهد 220 ك.ف - جهد 66 ك.ف - جهد 11 ك.ف وأثناء ظروف التشغيل العادية
- أثناء تنفيذ المناورة وعند حدوث أي عطل يجب الرجوع للتحكم والإبلاغ عن ذلك مع إخطاره بالخطوة التي حدث بها العطل سواء كان أثناء التنفيذ بخاصية الريموت أو خاصية المحلي أو خاصية اليدوي.
- ضرورة اتباع تعليمات التشغيل الخاصة بمناورات الفصل والتوصيل للدوائر جهد 220 ك.ف - 66 ك.ف على أن تراعى النقاط التالية وإدراجها بالخطوات التنفيذية لاستمارة المناورة:
 - أ- يتم فصل القواطع من الجهتين والتحقق من تمام الفصل بالطرق الآتية:
 - إشارات أوضاع الاشتغال بالقواطع.
 - اختفاء التيارات على الثلاثة أوجه.
 - اختفاء الجهود على الثلاثة أوجه للقراءات الوجهي والأرضي.
 - ب- يتم استكمال فصل السكاكين من الجهتين للخطوط والقضبان.
 - ت- التأريض للدائرة في حالات أعمال الصيانة عليها.
 - ث- التأكيد على استقلالية خطوة الأرضي عند عمل مناورات.
- عند انسحاب الجهد من المحطة تلقائياً يتم عمل الآتي مباشرة :
 - أ- فصل المغذيات جهد 11 ك.ف
 - ب- فصل المفتاح الرئيسي للمحولات الرئيسية جهد 66 / 11 ك.ف من جهة 11 ك.ف.
 - ت- فصل المفتاح الرئيسي للمحولات الرئيسية جهد 66 / 11 ك.ف من جهة 66 ك.ف.
 - ث- خفض مغير الجهد كتعليمات مهندس وردية التحكم
 - ج- إبلاغ مهندس وردية التحكم بذلك وانتظار التعليمات.

■ عند عودة الجهد يتم الآتي:

- أ- توصيل المفتاح الرئيسي للمحولات من جهة 66 ك.ف.
- ب- توصيل المفتاح الرئيسي للمحولات من جهة 11 ك.ف .
- ت- توصيل المغذيات من جهة 11 ك.ف بالتنسيق مع مهندس تحكم طلخا و تحكم التوزيع.
- ث- تعديل نقطة مغير الجهد حسب النقطة المنقطة عليها سابقا
- الاهتمام بتسجيل العلامات بدقة عند خروج أي مهمة (خط - محول - مغذي) وإبلاغها مباشرة.
- الإبلاغ بالقراءات الصحيحة لأي من مهمات المحطة.
- الاهتمام بوسائل الاتصال (اللاسلكي أو التليفون) والتأكد من أنهم في حالة جيدة.
- الاهتمام بالتيار المستمر من ناحية البطاريات أو الشواحن.
- الاهتمام بكيفية قراءة الأجهزة وخاصة جهاز معامل القدرة سواء مباشر أو غير مباشر .
- مراقبة درجة حرارة الملفات والزيت للمحولات جهد 66 / 11 ك.ف والتأكد من سلامة تشغيل المراوح.
- عند اشتغال الجهاز التسرب الأرضي المقيد Restricted earth fault تكون منطقة العطل على المحول من جهة 11 ك.ف.

■ نموذج للعلاقة بين مركز تحكم رئيسي وبين تحكم شركة توزيع :

وسنعرض هنا نموذج لتنسيق العمل بين تحكم طلخا (تحكم اقليمي رئيسي) وتحكم شركة التوزيع :

- أ- في حالة حدوث أعطال على المغذيات جهد 11 ك.ف والخارجة من محطات المحولات وحدث فصل تلقائي للمغذي بأي جهاز وقاية يتم التعامل بين مراقب الوردية بمحطات المحولات ومهندس الوردية بتحكم التوزيع مباشرة، وفي فترة الذروة المسائية عند حدوث أي طوارئ يتم الرجوع إلى تحكم طلخا.
- ب- مناورات الفصل - التوصيل الخاصة ببرنامج الصيانة - الاختبارات الدورية - والطوارئ للمغذيات الخارجة من محطات المحولات مناورة الفصل والتوصيل تتم بين مراقب الوردية بمحطة المحولات ومهندس الوردية بتحكم شركة التوزيع والمسئول عن طلب الفصل والتوصيل هو مهندس الوردية بتحكم التوزيع فقط.
- ت- انسحاب التيار عن لوحات التوزيع والمغذيات الهوائية جهد 11 ك.ف التعامل بين مهندس وردية تحكم وسط الدلتا بطلخا مع مراقب الوردية وأخطار تحكم التوزيع بالوضع والاتفاق معاً على كيفية إرجاع الوضع العادي.

- ث- عند طلب تخفيف أحمال لظروف طارئة بالشبكة التعامل بين تحكم وسط الدلتا بطلخا ومراقب الوردية في المحطات مباشرة ويخطر مهندس وردية تحكم طلخا بالوضع مهندس تحكم شركة التوزيع .
- ج- عند طلب رفع الجهد في منطقة معينة بشبكة جهد 11 ك.ف التعامل بين مهندس شركة التوزيع وتحكم وسط الدلتا بطلخا على أن تكون التعليمات الصادرة لمراقب وردية المحطة من مهندس تحكم طلخا فقط.
- ح- دراسة الأحمال على المغذيات واللوحات وتبادل الطاقة في الشبكة يتم التعامل بين مهندس الوردية في كلا من تحكم التوزيع والتحكم الإقليمي

الباب الرابع

منظومة التوزيع الكهربائية

(DISTRIBUTION SYSTEM)

17

ملامح تخطيط شبكات التوزيع

17.1 مقدمة

يطلق مصطلح "منظومة التوزيع الكهربائية" على كلا من شبكتي الجهد المتوسط والجهد المنخفض .
فأما قيم الجهد المتوسط فهي : 3.3 kV – 6.6 kV – 11 kV – 22 kV – 33 kV
وأما قيمة الجهد المنخفض فهو 400 فولت في معظم الدول ، و في أمريكا فهي 220 فولت (Line Voltage).

ومنظومة التوزيع للجهد المتوسط يقصد بها شبكة المغذيات الأولية (PRIMARY DISTRIBUTION)، و هي التي تنقل القدرة من المحطات الرئيسية جهد 66/11 مثلا إلى (الموزعات) ، ثم من الموزعات إلى محولات التوزيع المنتشرة داخل الأماكن السكنية. وتتضمن منظومة التوزيع العناصر التالية:

- لوحات توزيع الجهد المتوسط (الموزع) وهي أول نقطة في شبكة توزيع الجهد المتوسط وتستقبل كابلات المغذيات من محطات التحويل الرئيسية.
- خطوط الجهد المتوسط التي تخرج من الموزعات إلى المحولات وتشمل خطوط هوائية أو كابلات أرضية أو الاثنين معا.
- أكشاك سكاكين شبكة الجهد المتوسط للمساهمة في عمل مناورات تغيير الخطوط.
- لوحات الـ RMU وهي وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات في الشبكة من جهة الجهد المتوسط .
- محولات التوزيع وهي آخر عناصر شبكة الجهد المتوسط ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض.

وأما الجزء الثاني من منظومة التوزيع فيشمل اللوحات والكابلات الموجودة في جهة الجهد المنخفض من محول التوزيع. وهذا الجزء تم تغطيته في كتابي المرجع في التركيبات الكهربائية ، فلن نتعرض له هنا.

و كل من يتعامل مع تخطيط شبكات التوزيع لابد له أن يكون قادرا على رؤية الصورة الكاملة لمنظومة التوزيع ، كما يجب أن يتعرف على ملامح تخطيط هذه المنظومة ، وخطوات إنشائها ، وأدوات تنفيذ ذلك ، ومعرفة عناصرها ، وأن يكون متمكنا كذلك من بعض الأدوات والبرامج التي تساعده في عملية التخطيط.

ويمكن أن نوجز أهم هذه المفاهيم والأدوات الأساسية التي يجب أن يلم بها أى دارس لشبكات التوزيع فى الخمس نقاط التالية:

17.1.1 معرفة وتحقيق الأهداف الأساسية لعملية تخطيط الشبكات:

كل مصمم أو مخطط لمنظومة التوزيع يجب عليه تحقيق الأهداف التالية فى تصميمه :

- ✚ تحديد مواقع وأحجام المحولات ، و الـ C.B ، و الـ switches ، و الـ feeders .
- ✚ تحقيق الأمان Electric Safety خاصة أن هذه الشبكة هى الأقرب للمستهلكين .
- ✚ تحقيق البساطة فى التصميم لاسيما فى الدول النامية التى لا تتوفر فيها مستوى عال من التعليم .
- ✚ تقليل القدرة المفقودة Power Losses فى الشبكات
- ✚ تحسين قيم الجهود Voltage Profile عند الأماكن المختلفة بتقليل الـ Voltage Drop .
- ✚ دراسة لخطة وضع (المكثفات و منظومات الجهد) كمحسنات للجهد و وسائل لتقليص الفقد ومن ثم إضافتهم لخطة التوزيع للشبكة ، وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم .
- ✚ استخدام Distributed Generators DGs واستخدام الـ Cross Connection, CCs كمحسنات للاعتمادية (CC هى أجهزة تقوم بتوصيل الـ (Feeders) ببعضها حيث يمكن تغذية الحمل من Feeder آخر إذا حدث Fault بالـ Feeder الأساسى) . ثم أخذهم فى الاعتبار عند التخطيط لشبكة التوزيع . وعمل دراسة عن أفضل الأماكن لهم وكيفية تقليل عددهم .
- ✚ رفع قيمة معاملات الاعتمادية Reliability Index ، (وخاصة فى الأحوال الاستراتيجية والأكثر أهمية مثل أحوال المستشفيات) . مع العلم أن رفع مستوى اعتمادية مصدر التغذية بدرجة كبيرة يعنى تكلفة ضخمة ، ولذا يكون غالبا هناك نوع من الموازنة بين ضمان استمرارية التغذية وبين التكلفة .
- ✚ تحقيق المواصفات القياسية الوطنية المتعلقة بتصميم الشبكات لضمان تماثل أجزاء الشبكة وتسهيل عمليات الصيانة وتوفير قطع الغيار ، فالاستعانة بشركات أجنبية متعددة فى مشروعات مختلفة يمكن أن يترتب عليه شبكات توزيع غير متناسقة فى البلد الواحد بسبب اختلاف المواصفات التى تتبعها كل شركة .

مع الأخذ فى الاعتبار أن تحقيق هذه الأهداف ليس بالأمر الهين ، فبعض هذه الأهداف متعارض ، وهناك أيضا بعض المحددات التى يجب أن تؤخذ فى الاعتبار لضمان تحقيق الأهداف ومنها:

- ✚ الميزانية المتاحة للتكلفة
- ✚ الموقع الجغرافى للحمل : وهذا يؤثر على موقع المحطة بعدها أو قربها من الحمل كما يؤثر على قيمة المفاقد

أحجام المحولات والمساحة المتاحة للمعدات .

التوسعات المستقبلية

17.1.2 القدرة على عمل الدراسات الخاصة بالأحمال Load Studies:

أى دارس لمنظومة التوزيع عليه أن يكون مجيدا لمجموعة دراسات تتعلق بالأحمال، وتعتبر أدوات هامة فى التصميم وهى :

حسابات تقدير الأحمال Load Estimation

تقدير الأحمال المستقبلية Load Forecasting

دراسة خصائص الأحمال Load Characteristics

وتحت هذا البند يجب أن يلم الدارس أيضا بطبيعة الأحمال التى تغذيها شبكة التوزيع ، وهى ثلاثة أنواع:

- أ. أحمال سكنية سواء فى المدن او القرى
- ب. أحمال خدمات (شوارع - مطارات مباني حكومية - مولات تجارية)
- ت. أحمال صناعية (الورش والمصانع الصغيرة والكبيرة).

والاختلاف الأساسي بين هذه الأحمال يكمن فى طريقة حساب معاملات تقدير الأحمال مثل معامل الطلب Demand Factor الذى يستخدم لتحديد نسبة تزامن تشغيل أحمال من نفس النوع (دائما أقل من واحد) ، و معامل تباين الأحمال Diversity Factor الذى يستخدم لتحديد نسبة تباعد تشغيل الأحمال ذات النوعيات المختلفة (دائما أكبر من واحد) ، كما أن هناك أموراً أخرى تؤخذ فى الاعتبار مثل تيار البدء للمحركات الكبيرة فى الورش أو المصانع.

وأحيانا تغذى شبكة التوزيع الواحدة مزيجا من الأحمال الثلاثة ، ماعدا المصانع الكبيرة فدائما يكون لها شبكة توزيع مستقلة.

أما حسابات الحمل المتوقع Load Forecasting فهى تعتمد على عوامل كثيرة ملخصها فى الشكل 1-17. ويعد توقع الحمل " Load Forecasting " من الخطوات المهمة فى تحديد عملية التشغيل والتخطيط للشبكة ، حيث أنه يكون من أوائل الخطوات بالإضافة لكونه العامل الرئيسى فى تحديد حجم المحول .

وينقسم الـ Load Forecasting تبعاً للمدة إلى ثلاثة أقسام :

1. Short term load forecasting: up to 1 day
2. Medium term load forecasting: from 1 day to 1 year
3. Long term load forecasting: from 1 year to 10 years

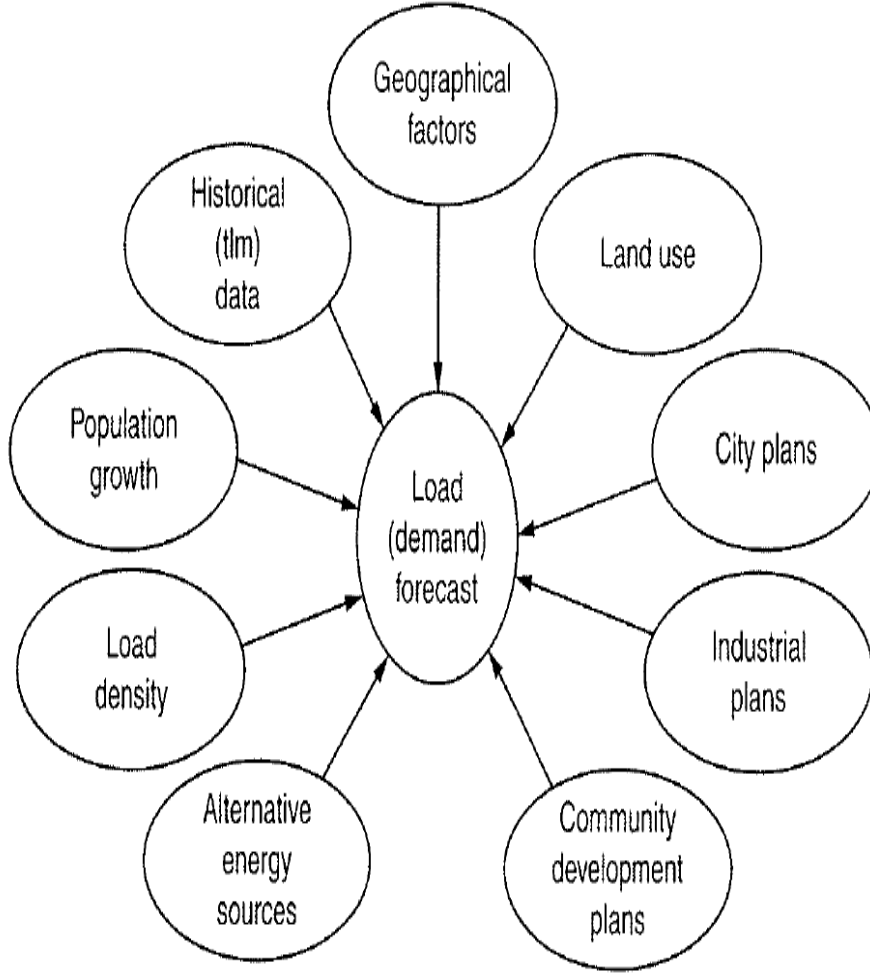


Figure 17-1 العوامل المؤثرة على قيمة الطلب المتوقع

17.1.3 القدرة على توصيف عناصر شبكات التوزيع :

من الأمور الهامة لأي دارس لمنظومات التوزيع أن يكون ملماً بطبيعة ومواصفات المعدات الأساسية التي سيستخدمها لتنفيذ شبكة التوزيع. وأهم المعدات في شبكة الجهد المتوسط التي يجب أن يعرف مواصفاتها هي:

- الموزعات Distributors
- المحولات بأنواعها
- لوحات الربط الحلقى Ring Main Unit
- كابلات الجهد المتوسط : توصيفها وتقاصيل طبقاتها
- عناصر شبكات الجهد المتوسط الهوائية (العوازل — السكاكين — إلخ)
- عناصر شبكة الجهد المنخفض (كابلات ، قواطع ، لوحات توزيع ، ATS ، UPS ، مولدات الديزل ، إلخ) .

- عناصر منظومة التحكم والمراقبة فى الشبكة (RTU ، SCADA ، إلخ).

ويجب على مهندس التوزيع أن يكون خبيراً بأنواع ومواصفات كل عنصر من العناصر السابقة.

17.1.4 معرفة البدائل المتاحة فى عملية تصميم شبكات الجهد المتوسط

تخطيط شبكات التوزيع يتضمن بدائل متعددة واختيارات كثيرة للبند الواحد ، وسيكون على المهندس أن يتخذ قرارات باختيار معينة من ضمن هذه البدائل المتاحة. ولذلك يجب أولاً أن يكون ملماً بهذه البدائل وميزاتها وعيوب كل بديل. ومن أمثلة البدائل المتعددة التى سيواجهها المهندس مايلى:

- نوع أسلوب التوزيع Radial / Ring
- نوع الشبكة Over Head/Cables
- نوع المحولات (جافة /زيتية)
- مستوى جهد التغذية 11/22 kV
- نوع المحطة AIS/GIS
- نوع أجهزة الوقاية CB / Fuse
- كابلات أم Bus Duct
- نظام الـ BB وهل هو Single/ Double/etc
- طرق تحسين الجهد Voltage regulators/Capacitors/ Tap changer
- هل نستخدم الـ Distributed Generation أم لا ، وما أنسب مكان /حجم/نوع.

17.1.5 القدرة على عمل الدراسات المطلوبة لعملية التخطيط

والغرض من هذه الدراسات والحسابات التى يحتاجها مهندس التوزيع هو التأكد من صحة التصميم ومنها:

- حسابات القصر Short Circuit Studies
- حسابات الهبوط فى الجهد Voltage Drop
- حسابات التحمل الحرارى للكابلات Thermal capacity
- تنسيق أجهزة الوقاية Relay Coordination
- حسابات سريان القدرة Load flow Study
- حسابات وقياسات التوافقيات Harmonics Studies

وكل هذه الدراسات يمكن أن تتم باستخدام برامج جاهزة مثل برنامج ETAP أو برنامج EasyPower وغيرهما (توجد نبذة عن هذه البرامج والفروق بينها في نهاية الباب). وبعض هذه البرامج متاح مجانا على الإنترنت ، وعلى كل دارس لشبكات التوزيع أن يكون محترفا على الأقل في واحد من هذه البرامج .

17.2 استخدام الـ Optimization Techniques

تبدأ عملية التخطيط الفعلي لشبكات التوزيع بعد انتهاء الدراسات الأولية بتحديد أماكن المحولات وقدراتها . وبناء على أماكن المحولات فإننا نحدد طريق الـ (Feeders) الخاصة بالجهد المتوسط و الجهد المنخفض . وبالطبع فنحن نحتاج إلى طريقة سريعة للوصول لأفضل الأماكن التي تؤدي إلى تقليل التكاليف الخاصة بالمحولات والـ (Feeders) وأيضا تقليل المفاقد (Losses) ، كما نحتاج للوصول إلى أعلى قيمة من الاعتمادية (Reliability) للشبكة ، مع الأخذ في الاعتبار تخفيض قيمة الـ (voltage drop) لتكون في المدى المسموح به وفقا للمواصفات.

ومعظم هذه المتطلبات متعارض مع بعضها البعض ، فتقليل الـ Loss قد يكون بزيادة مقطع الكابلات وهذا يزيد التكلفة ، وهكذا ، وهذا هو المدخل الذي دعانا لاستخدام مبادئ الـ Optimization في تخطيط شبكات التوزيع وتعنى الوصول لأفضل الحلول ، فالحل اليدوي سيظل قاصرا أمام الكم الكبير من الأهداف المتعارضة ، والبديل هو استخدام الـ Optimization.

17.2.1 كيفية الوصول للحل الأمثل

دائما يكون الفاصل في اختيار حل ما هو ما ستجنيه من مكاسب ، وهذه المكاسب هي ما يعبر عنه رياضيا بالـ Objective Functions أى المكاسب المرجوة ، فقد تكون الـ Objective Function لنظام ما هو زيادة الـ Stability Margin مثلا ، وقد تكون تقليل الفقد في الطاقة ، وقد تكون التكلفة الأقل إلى غير ذلك من المكاسب المرجوة . وفي مثل هذه الحالات نكون أمام ما يسمى بـ Single Objective Function . وفي المقابل قد يكون هدفك تحقيق عدة مكاسب وهو ما يسمى بالـ Multi-Objective Functions

وسواء كان هدفك هو مكسب واحد أو مكاسب متعددة فسيكون أمامك اختيارات متعددة ، فمثلا إذا كان الهدف هو زيادة الـ Stability Limit عن طريق وضع مكثفات ثابتة في الشبكة فسيكون لديك مشكلة جديدة وهي : في أى محطة نضع هذه المكثفات وهل نضعها في محطة واحدة أم نوزعها على أكثر من محطة؟

وهذا هو المدخل لما يسمى بالـ Optimization Techniques كما ذكرنا . وهي أساليب رياضية متعددة الأشكال لكن خلاصتها أنك تكتب Objective Function معينة تهدف للوصول إليها ، و هذه الـ Function مكتوبة بدلالة عناصر متغيرة (وحيدة أو متعددة) ، وبالطبع أيضا سيكون هناك عدد من الـ Constrains أى شروط ومحددات للحل بمعنى أن الحل الأمثل هو مثلا من يعطيني تغيرا في الجهد لا يتجاوز 3% بالزيادة أو النقصان

وبشرط ألا يتجاوز حجم المكتفات المستخدمة مثلاً قيمة الحمل المركب إلى غير ذلك من الشروط التي تضعها لتضمن أن يكون الحل الذي تبحث عنه بواسطة الـ Optimization Technique عملياً ومقبولاً.

ويكون دور الـ Optimization Technique المستخدم هو سرعة الوصول للحل الأمثل وتحديد القيمة المثلى للمتغيرات مع تحقيق الشروط الموضوعية حيث أن العملية تحتاج لتجربة قيم مختلفة ومتعددة ولا يصلح معها بالطبع الحل اليدوي.

ومن هذه الطرق:

1. Particle Swarm Optimization, PSO

2. Genetic Algorithms

3. Cuckoo Search

وبالطبع لكل واحدة منها مميزات وعيوبها من حيث سرعة الوصول للهدف والدقة في تحقيق الهدف.

وحتى يمكن المقارنة الصادقة بين الحلول المقترحة من الباحثين فقد قامت الـ IEEE بوضع عدة نماذج لشبكات التوزيع تختلف في عدد الـ BBs وقدرات الأحمال . والشكل 17-2 هو واحد من هذه الأشكال ويعرف بشبكة الـ 33-BBs.

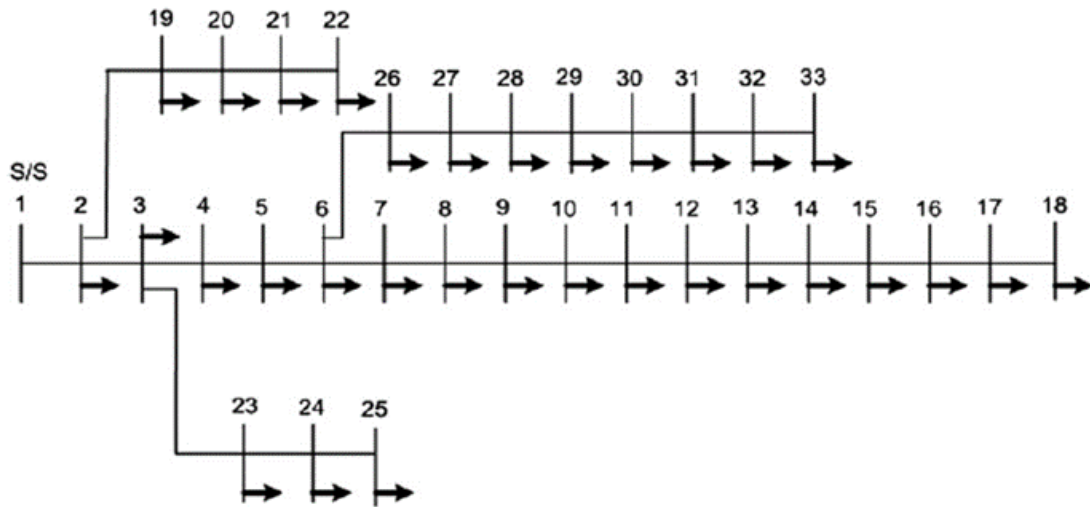


Figure 17-2 IEEE 33-bus

وهذه الشبكات متاحة للجميع بحيث تتم تجربة أي أسلوب مقترح على نفس الشبكة وبالتالي تكون المقارنة صادقة بين الأساليب المختلفة.

17.3 خريطة هذا الباب

الفصل الأول من هذا الباب بعد هذه المقدمة يدرس أمثلة تطبيقية لخطوات تصميم شبكة توزيع ، و سيجد القارئ أن معظم الخطوط العريضة التي عرضت هنا في هذه المقدمة قد مررنا بها خلال هذه الأمثلة التطبيقية. لكن بعضا من هذه الخطوط سيحتاج لمزيد من التفاصيل ، وهو ما سنقدمه في الفصول من الثاني إلى الخامس في هذا الباب.

ففي الفصل الثاني من هذا الباب (الفصل 18) نتعرض لدراسة أهم عناصر شبكة التوزيع وتشمل:

- 1- الموزعات Distributors .
- 2- محولات التوزيع.
- 3- لوحات الربط الحلقى الـ RMU ، والربط مع شبكة الجهد المنخفض

بينما يخصص الفصل الثالث من هذا الباب (الفصل 19) لدراسة منظومات التغذية المختلفة في شبكات الجهد المتوسط ، وكذلك دراسة تأثير دخول التوليد الموزع Distributed Generation على شبكات التوزيع .

ويخصص الفصل الرابع من هذا الباب (الفصل 20) لدراسة الشبكات الهوائية ، بينما يخصص الفصل الأخير (الفصل 21) لدراسة الاعتمادية وتنظيم الجهد ، وأيضا دراسة منظومة التحكم والمراقبة في شبكة الجهد المتوسط.

18

أمثلة تطبيقية لتخطيط شبكات الجهد المتوسط

فى هذا الفصل سيتم تحديد مراحل عامة فى تخطيط وتصميم شبكات التوزيع من خلال مثال تطبيقي . (بعض الأمثلة فى هذا الفصل مأخوذة بتصرف من مقال للمهندس يسرى عبد السلام)

18.1 مراحل تصميم شبكة توزيع

18.1.1 المرحلة الأولى: تقدير الأحمال

سنتخيل بناء مدينة جديدة أو توسعات ملحقة بمدينة ما. فالمرحلة الأولى دائما هى مرحلة حسابات تقدير الأحمال . وبالطبع هذا سيتوقف على طبيعة الأحمال فى هذه المنطقة ، فتقدير الأحمال السكنية يختلف عن تقدير الأحمال الصناعية مثلا ، بل أن الأحمال السكنية نفسها تختلف حسب مستوى المعيشة ، وهل هو إسكان فاخر أم إسكان شعبى إلخ.

وكذلك الأحمال الصناعية تتغير تقدير الأحمال فيها حسب كثافة استهلاك الطاقة لإنتاج المنتج المطلوب. والجدول 1-18 يعطى نموذجا لكثافة استهلاك الطاقة فى بعض الأنشطة الصناعية .

تقدير مبدئى للأحمال الصناعية Table 18-1

المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)	المنتج	الطاقة الكهربائية لكل وحدة منتجة (KWh)
أسمنت (طن)	١١٢	سكر خام (طن)	٢٢٠
البنزين (طن)	٣.٥	الصوديوم (كيلوجرام)	١١
ورق (طن)	٥٠٠	الألمنيوم (كيلوجرام)	٢٠
فوسفات الأمونيوم (طن)	١٦	حامض الكبريت (طن)	٣٦
صلب (طن)	٢٣٠	الأمونيا والكلور (طن)	١٦٨٠
حديد خام (طن)	٢٥	سجاد (١٠٠٠ متر مربع)	١٧٧٠

ومن ثم فيمكن بمعلومية المساحة ونوعية الأحمال والخطط المستقبلية للتوسعات الوصول إلى تقدير لأحمال هذه المدينة.

وبالطبع سنحتاج في هذه المرحلة لدراسة معاملات مهمة مثل معامل الطلب Demand Factor ، ومعامل التشتت أو التباين Diversity Factor وغيرها . وصعوبة هذه المعاملات أنها تقديرية وليست ثابتة وتحتاج لمناقشات مع الخبراء في هذا النشاط.

كما سنحتاج في هذه المرحلة لتحديد الأحمال غير العادية مثل المحركات الكبيرة ذات تيار البدء المرتفع والأحمال الصناعية الخاصة إن وجدت وخاصة الأفران وماكينات اللحام الكبيرة ، والأحمال ذات دورات التشغيل الخاصة.

وعادة فإن التصميم يبدأ من أسفل لأعلى أى من الأحمال إلى محطات التغذية كما في الشكل 1-18 ، فعند تصميم شبكة يجب معرفة عامل الطلب Demand Factor, F_{dm} للأحمال المتشابهة ، وعامل التباين Diversity Factor, F_{dv} للأحمال المختلفة على الموزعات الفرعية بالشبكة لتحديد الحمل الأقصى Max Demand, D لكل موزع فرعى ، ثم نجمع هذه الأحمال القصوى لكافة الموزعات الفرعية ونقسمها على معامل التباين (دائما أكبر من واحد صحيح) لهذه الموزعات وبالتالي نحصل على الحمل الأقصى للموزع الرئيسي ، ومجموع الأحمال القصوى للموزعات الرئيسية مقسوما على معامل تباينها يعطى الحمل الأقصى لمحول التوزيع الموجود في مراكز الأحمال ، وتكرر العملية حتى نصل لمحطة التحويل.

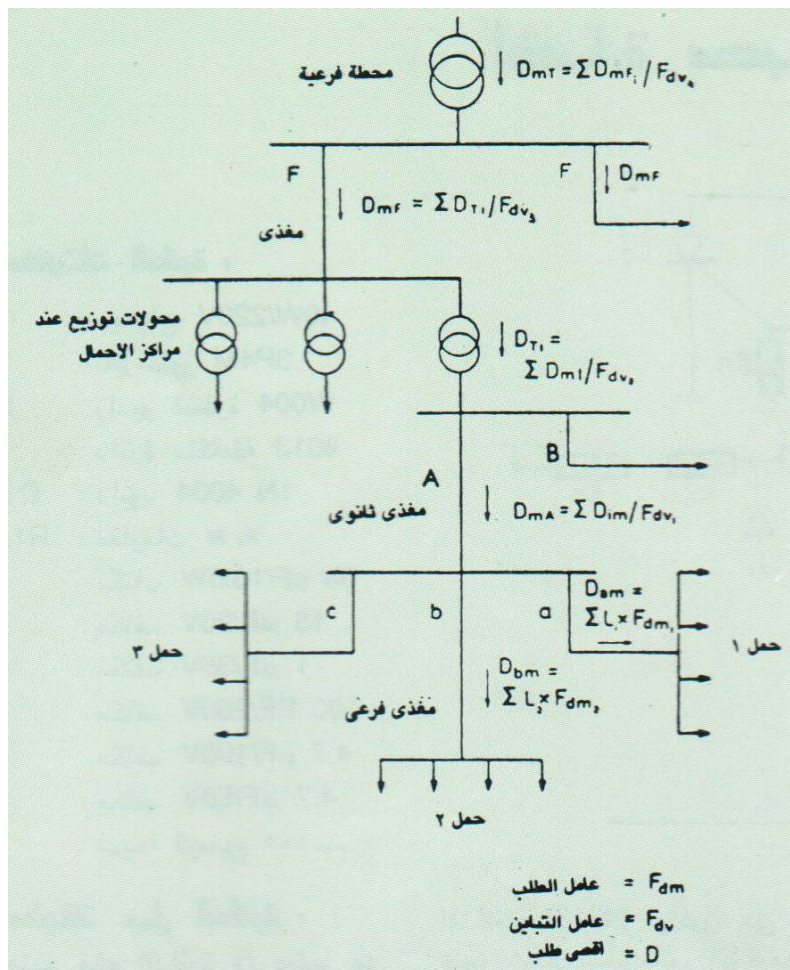


Figure 18-1 مراحل تطبيق معاملات الأحمال

18.1.2 المرحلة الثانية : إختيار جهد محطة التوزيع

يمكن تقسيم محطات التوزيع Distribution Substations إلى نوعين:

- 1- محطات توزيع ابتدائية جهد 11/132 ك ف أو 11/66 ك ف ، أو 11/33 ك ف ، وهذه المحطات هي حلقة الربط مع شبكة الجهد العالي وتمثل بداية شبكة الجهد المتوسط. ويشتمل هذا النوع من المحطات على عدد من العناصر مثل المحولات والقواطع وقضبان التوزيع وسكاكين العزل وأجهزة التحكم والوقاية والقياس والاتصالات إلخ . وهي بذلك تشبه تماما محطات التحويل التي درست في الباب الثالث ، ولذا لن نعيد الكلام عنها هنا. ونكتفي فقط بهذا الـ SLD لمحطة جهد 11/66 ك ف شكل 18-2 ، كنوع من اختبارات التذكر ، ويفترض الآن أن نقرأه بسهولة حتى لو لم نكتب اسم العنصر على الرمز المستخدم.

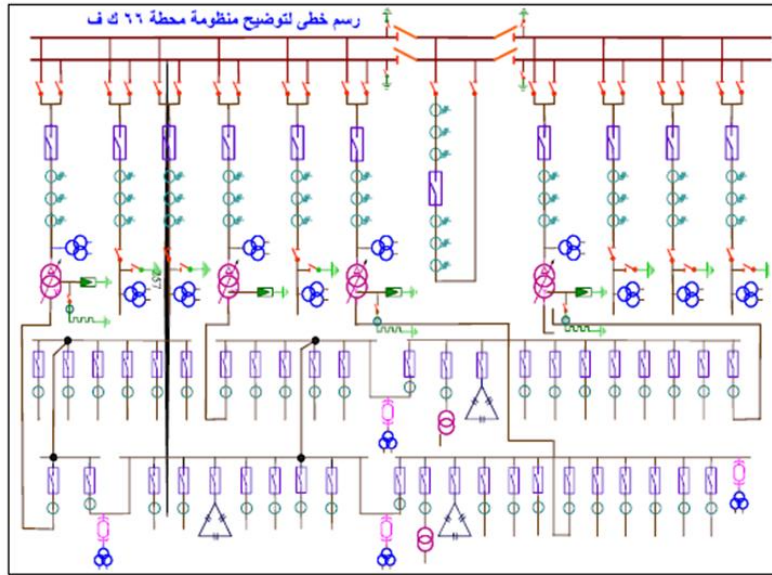


Figure 18-2 Substation SLD

- 2- محطات توزيع ثانوية (محطة الخدمات أو أكشاك المحولات) وتعمل على جهد 11/0.4 ك ف (المدن القديمة في مصر مثل حلوان أو المعادي) أو 22/0.4 ك ف (المدن الجديدة مثل التجمع الخامس أو 6 أكتوبر ، والمناطق السياحية) ، وهذه المحطات تمثل قلب شبكة الجهد المتوسط. وهي أقل حجما وأبسط في التركيب من المحطات الابتدائية ، فغالبا تضم فقط محول أو أكثر متصلين على Sectionalized Single BB أو Single BB ، وتتصل من ناحية بالـ RMU ومن ناحية أخرى بكشك أو أكشاك توزيع الجهد المنخفض .
- وغالبا تكون منظومة الوقاية فيها مبسطة ، وقد لا تتجاوز في بعض الأحيان استخدام فيوزات للحماية كما هو الحال مع المحولات ذات القدرة الأقل من 1MVA ، إضافة إلى بعض المعدات الأخرى البسيطة كما سنرى.

3- وبين هذين النوعين من المحطات توجد الموزعات Distributors التي تستقبل المغذيات الخاصة بها Incoming Feeders من المحطات الابتدائية ثم تخرج منها كابلات الـ Outgoing Feeders إلى المحطات الثانوية (لا يوجد بالموزعات أى محولات ، سوى محول صغير فقط لخدمة مهمات الموزع نفسه كما سندرس ذلك تفصيلاً)

وعليك فى هذه المرحلة من التخطيط أن تحدد :

- هل سنحتاج مثلاً إلى محطة محولات جهد 66/11 or 66/22 or 33/11 كمرحلة أولى ، ثم بعد ذلك هل ستستخدم محولات توزيع جهد 11/0.4 kV أو جهد 22/0.4 kV كمرحلة ثانية للوصول للمستهلكين ، أم ستختار محطة جهد 11/0.4 kV مباشرة كمرحلة واحدة .
- وهذا بالطبع سيتوقف على القدرة الإجمالية (KW) للحمل المحسوب فى المرحلة السابقة.

لاحظ أنه فى المدن الجديدة والمناطق الصحراوية يكون جهد دوائر الدخول و الخروج فى الموزعات هو 22 kV وذلك ليتحمل الأحمال الجديدة حيث يتم رفع الجهد لينخفض التيار فى الكابلات (أو الخطوط الهوائية) و يؤدي ذلك إلى زيادة قدرة الكابل (أو الخط) فيتحمل ضعف الأحمال تقريباً (لنفس مساحة المقطع) مقارنة بجهد 11kV ، لكن بالطبع على حساب زيادة عزل الكابل.

و يمكن الاسترشاد بالقيم التالية عند اختيار الجهد المناسب للمحطة الرئيسية:

- ✚ عندما تكون القدرة بين 100 kW إلى 5MW يتم التغذية بجهد 11 kV
- ✚ ما بين 5MVA إلى 15MVA يتم التغذية بجهد 22 kV
- ✚ ما بين 15MVA إلى 30MVA يتم التغذية بجهد 33 kV

والقدرة الأكبر من ذلك تنقل عبر شبكات النقل حسب الجهود التالية:

- ✚ ما بين 30MVA إلى 75MVA تنقل عبر خط بجهد 66 kV
- ✚ ما بين 75MVA إلى 200MVA تنقل عبر خط بجهد 132 kV
- ✚ وعندما تزيد القدرة عن 200MVA تنقل عبر خط بجهد 500 kV أو 220 kV.

وبالطبع قد تختلف هذه الحدود من دولة لأخرى.

مع ملاحظة أن اختيار جهد الدخول سيؤثر على اختيارات أخرى كثيرة بعد ذلك، منها اختيار حجم الموصل الذى يكون دائماً متناسباً مع التيار المار به ، و يتأثر هذا الاختيار بالقدرة المنقولة والمسافة التي سيقطعها الكابل الرئيسي للوصول للمحطة حيث يجب أن نأخذ بعين الاعتبار سعة تحمل الأسلاك للتيار.

فمثلاً فى حالة نقل قدرة 22 MVA إلى منطقة بعيدة تصل إلى 25 كيلو متر مثلاً ، فإذا نقلنا القدرة بشبكة جهد 11 kV سيكون التيار المنقول يساوى 1157A ، وبالتالي يجب اختيار كابل له مساحة مقطع كبيرة نسبياً لتحمل هذا التيار العالي ، ولكن إذا رفعنا جهد خط النقل إلى 33 kV فسيقل التيار ونقل مساحة المقطع للكابل.

وتوجد علاقة رياضية تساعد في حساب الجهد المناسب لخط معين حسب القدرة المنقولة P وحسب طول الخط الناقل L بالكيلومتر كما في المعادلة التالية:

$$V = 5.5 \sqrt{L + \frac{P}{100}}$$

وفي هذه المرحلة سيكون علينا حسم قيمة نسبة تحويل المحولات:

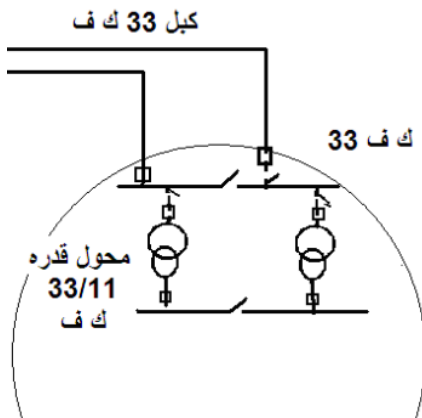
بالطبع سنحتاج لترتيب محول ليخفض الجهد العالي من 66 kV أو 33kV إلى جهد 400 فولت ولكن هذا غير مفضل لأن تصنيع هذه المحولات يحتاج إلى درجة عزل عالية ، وبالتالي زيادة التكلفة و لذلك يتم التخفيض على مرحلتين:

- في المرحلة الأولى من 33 kV إلى 11 kV أو من 66 kV إلى 11 kV
- ثم في المرحلة الثانية يتم التخفيض مرة أخرى من 11kV إلى جهد التوزيع المنخفض (400 فولت) والذي يسمى بجهد التوزيع الثانوى.

18.1.3 المرحلة الثالثة : اختيارات المحطة / المحطات الرئيسية

بعد معرفة قيمة الحمل ، وتحديد مستوى الجهد تكون الخطوة التالية هي المفاضلة بين عدة خيارات خاصة بمحطة التحويل التى ستغذى المدينة . ولتحديد هذه الخيارات يجب الإجابة على الأسئلة التالية:

- هل نستخدم محول واحد كبير داخل المحطة أم مجموعة محولات أصغر حجما ؟



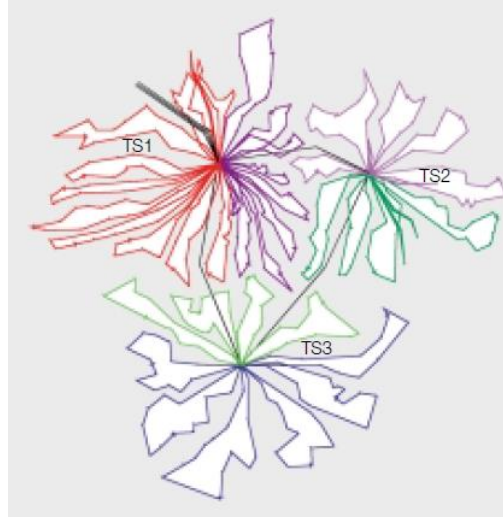
استخدام محولين للتغذية 18-3 Figure

فإذا تم تركيب محول واحد لتحويل جهد 33 kV إلى جهد 11 kV ثم حدث عطل بالمحول فستصبح المنطقة بكاملها غير مغذاة بالكهرباء ، ولذا يفضل استخدام محولين يوصلان معا على التوازي أو يكون أحدهما منفصل لكنه احتياطي للآخر عند حدوث أى مشاكل في التشغيل كما فى الشكل 3-18.

- أين نضع محطة التوزيع الرئيسية وأين نضع المحطات الفرعية؟

ويراعى عند تصميم محطات التوزيع الابتدائية 11/33 أو 11/66 مايلى:

- أن يكون موقع المحطة قدر الإمكان في مركز الأحمال لتقليل أطوال الكابلات وبالتالي يقل الفقد في القدرة و الهبوط في الجهد كما هو معلوم.
- Transformer Substations: لاحظ في الصورة التالية كيف وضعت المحطات الفرعية TS1, TS2 and TS3 () في مراكز الأحمال.



- أن تكون مساحة المحطة كافية لاستيعاب المحتويات من محولات ومفاتيح والملحقات الأخرى.
- أن يكون تصميمها مناسباً لدخول مغذيات الدخول ، وخروج كابلات الخروج بسهولة وبدون أي عوائق . وهذا يستدعي دائماً أن يكون موقع المحطة على شارع رئيسي لسهولة دخول المعدات.
- أن تكون قابلة للتوسع مستقبلاً عند زيادة الأحمال

18.1.4 المرحلة الرابعة : حسم أسلوب التغذية لشبكة التوزيع الابتدائية

نحتاج أن نقرر بعد ذلك هل الأنسب اختيار شبكة نقل هوائية أو يتم النقل بالكابلات؟ وما هو أنسب مسار لشبكة النقل؟

يراعى دائماً اختيار أقصر الطرق. و يفضل دائماً أن يكون المسار موازياً للطرق الرئيسية كلما أمكن ذلك ، وأن يبعد بمسافة تقريباً 30 م عن الطريق بحيث يمكن الوصول إلى الخط من أجل الصيانة بسهولة. وفي حالة المرور بأراضي زراعية يجب أن يكون الخط في مسار يسبب أقل خسائر ممكنة في موضوع نزع الملكية ، حتى يتم تقديم أقل تعويضات ممكنة وذلك لخفض التكاليف ، ويجب تفادي الكباري ومناطق المستنقعات وتفادي التوازي مع خطوط التليفونات حتى لا يحدث تداخل كهرومغناطيسي معها.

لكي يتم تصميم محطة توزيع ابتدائية يجب تحديد كلا من قدرة محولات القوى حسب حجم الأحمال ، ونوعية القضبان في لوحات توزيع الجهد العالي ، وعدد اللوحات وكذلك لوحات الجهد المتوسط وعددها وكذلك تحديد مقاطع الكابلات المستخدمة في الربط بين المكونات .

وفي هذه المرحلة يمكن تحديد عدد المغذيات للمحطة ، وهل يمكن مثلاً تغذية المحطة بكابل واحد من المحطة الرئيسية ؟

فلو فرضنا أن المدينة مقسمة إلى ثلاثة أجزاء وأن أحمال كل جزء تصل إلى 15MVA وأن الجهد المتوسط المستخدم في شبكة التوزيع هو 33 kV فهذا يعنى أن التيار المار في كابل التغذية يساوى

$$I = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 33} = 262A$$

وبعد أخذ معاملات الأمان في الاعتبار وكذلك معاملات الـ De-ratings من عمق الدفن والكابلات المتجاورة ودرجة الحرارة إلخ نجد أن أنسب كابل يصل مقطعه إلى 400 ملم² بعازل XLPE .

لكن استخدام كابل واحد سيتسبب في خروج الأحمال كلها مع حدوث أى عطل على هذا الكابل. ولذا يفضل تغذية المحطة بكابلين.

وبالطبع سيتوقف اختيار مقطع الكابلات وكافة معدات الشبكة على دراسة مستوى القصر Short Circuit Capacity ونوع التأريض والهبوط في الجهد المسموح به.

وهناك أسلوب آخر يمكن استخدامه أن يتم توصيل ربط المحطة الرئيسية ببقية المحطات الفرعية TS1,TS2, TS3 على شكل حلقة Ring كما في الشكل 4-18 .

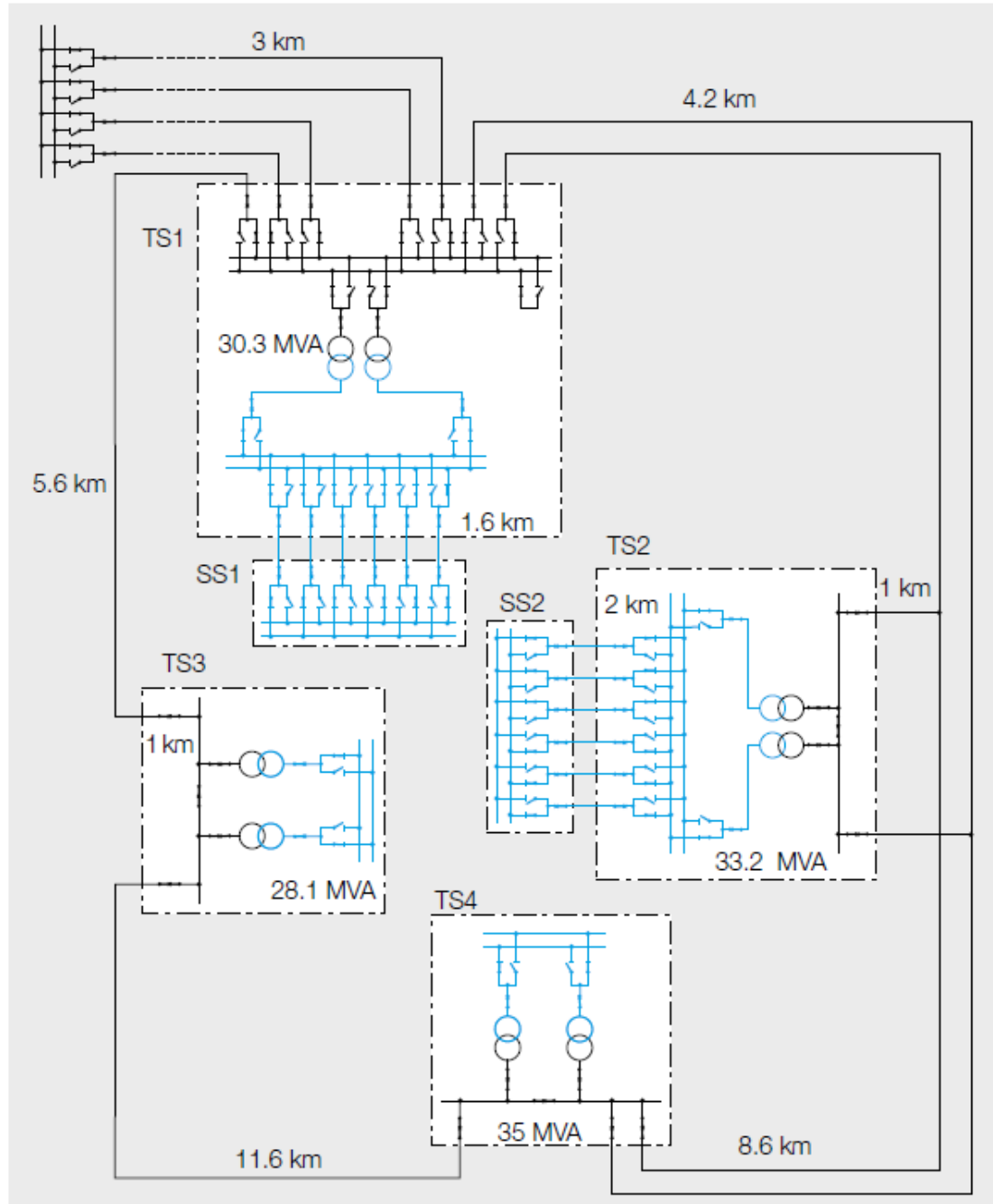


Figure 18-4 Ring Feeding

18.1.5 المرحلة الخامسة : حسم أسلوب التغذية الفرعية Radial/Ring ؟

أصبح الآن في كل منطقة بمخطط المدينة محطة محولات رئيسية جهد 11/33 ك ف ، ومطلوب من هذه المحطة أن تغطي الأماكن المختلفة في كل منطقة بمحولات جهد 11/0.4 ك ف لتغذية أحمال المستهلكين ، فلو فرضنا أن لدينا في كل منطقة من المناطق الثلاثة السابقة بها عدة تجمعات وكل تجمع يحتاج إلى محول منفصل قدرة 1.5 MVA ، فكل محول منهم سيحتاج لكابل تغذية مقطعه يتحمل تيار قدره

$$I = \frac{1500}{\sqrt{3} \times 11} = 78A$$

وبأخذ معامل أمان ومعاملات الـ De-rating فى الاعتبار وكذلك بعد أخذ احتمالات الهبوط فى الجهد فى الاعتبار سنجد أن أنسب كابل قد يصل إلى 95 ملم² نحاس . فى هذه الحالة يمكن أن يكون أحد طرق التغذية هى الطريقة Radial Feeding كما فى الشكل 18-5 حيث تتميز هذه الطريقة بالبساطة وقلة التكلفة ، لكن هذه الطريقة لها مع ذلك عدة عيوب منها:

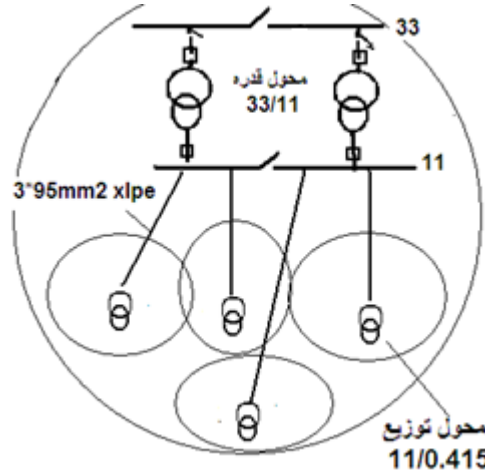
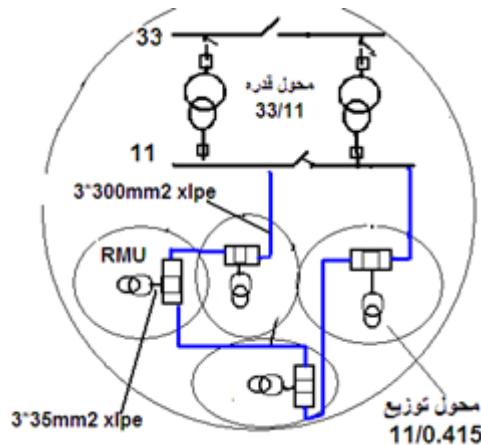


Figure 18-5 Radial feeders

- 1- إمكانية فصل وتشغيل المحول الفرعى موجودة فقط فى لوحات التوزيع الـ 11 kV أي تبعد عن المحول بمسافات كبيرة قد تتعدى الكيلو متر وهذا يصعب عمليات إصلاح الكابل مثلاً.
- 2- فلو فرضنا أن المنطقة تحتوى على 50 محول توزيع فرعى وليس أربعة كما فى الرسم فهذا يعنى أننا نحتاج إلى 50 خلية منفصلة فى الموزع وأيضا سنحتاج لكابلات بأطوال كبيرة وهذا طبعا غير منطقي.
- 3- حدوث عطل فى كابل تغذية المحول يؤدي لخروج أعمال هذا المحول من الخدمة .

وللتغلب على المشاكل السابقة يمكن استخدام طريقة التغذية الحلقية Ring System حيث يتم تغذية مجموعة



محولات من كل خلية في الموزع وليس محول واحد ، وكل محول من مجموعة المحولات سيتم تغذيته من خلال وحدة الـ Ring Main Unit, RMU التي تربط المحولات جميعا معا . وزيادة في تأمين الأحمال فإنه يتم ربط كل مجموعة محولات في حلقة تغذى من خليتين منفصلتين في الموزع كما في الشكل 18-6. تفاصيل أكثر عن هذه الطرق تجدها في الفصل التالي من هذا الباب .

Figure 18-6 Ring System

18.1.6 كيف يتم حساب مقطع الكابل في التغذية الحلقية؟

كان تحديد مقطع الكابل في طريقة الـ Radial System مبسطا ومباشرا ، أما هنا فنحتاج لتوضيح كيف سيتم حساب مقطع الكابل. بداية يجب تحديد ما هو أكبر عدد من المحولات التي يتم تغذيتها عبر الكابل ، فعلى سبيل المثال في الشكل السابق يكون الجزء الأول في الكابل معرضا لتحمل تيار أربعة محولات في حالة فصل التغذية من الجهة الأخرى ومن ثم يجب تصميم هذا الكابل على تحمل ذلك العدد.

لكن عمليا ، يتم التصميم بالعكس ، بمعنى أن الكابلات غالبا تستخدم بمقاطع موحدة في الشبكة ، و يعرف الكابل بقدرته على تغذية عدد معين من المحولات ، فمثلا كابل 300 ملم² يستطيع تحمل تيار قدره 400 امبير ، إذن قدرة هذا المغذى تساوى $7MVA = \sqrt{3} \times 11000 \times 400$ ، ولو فرضنا أن المحولات الموجودة قدرة 1MVA وأنها لا تحمل بأكثر من 70 % من قدرتها فهذا يعنى نظريا أن هذا الكابل يمكن أن يغذى عدد من المحولات يساوى عشرة محولات $10 = 7 \div 0.7$ وإن كان هذا الرقم عمليا سيتم تخفيضه لظروف الحرارة وبقيّة معاملات الـ De-rating ، فربما لا يتجاوز 7 محولات بدلا من عشرة.

18.1.7 المرحلة السادسة : حسم نوعية محطة التحويل الابتدائية

هوائية/غازية؟

كما هو معلوم ، يوجد نوعان من المحطات :



Figure 18-7 GIS building

1- النوع الأول هو محطات توزيع

ابتدائية معزولة بالغاز GasInsulated Substations

(GIS)، ويتواجد هذا النوع

من المحطات بداخل المدينة

حيث يتم وضع جميع مكونات

هذا النوع من المحطات بداخل

مبنى كما بالشكل 18-

7 (محطة بالسعودية) ، و

يحتوى بداخله على كل مكونات المحطة ، و تكون مكونات المحطة المعزولة بالغاز داخل خلايا

Bays (راجع فصل المحطات المعزولة بالغاز بالباب الثالث).

2- النوع الثاني من محطات التوزيع الابتدائية هي المحطات المعزولة بالهواء (Air Insulated

Substations (AIS). وفي هذا النوع من المحطات يكون الهواء هو الوسط العازل بين قضبان

التوزيع ، وتكون مكونات تلك المحطة بعيدة عن بعضها البعض بمسافات كبيرة نسبيا. وقد سبق دراسة

مميزات وعيوب كل نوع من أنواع المحطات (غازية أو هوائية) في الباب الخاص بمحطات التحويل.

18.1.8 المرحلة السابعة : اختيار نوعية قضبان التوزيع

في الباب الثالث درسنا أنواعا متعددة من قضبان التوزيع. لكن في محطات التحويل الصغيرة يكثر استعمال

نوعين فقط هما:

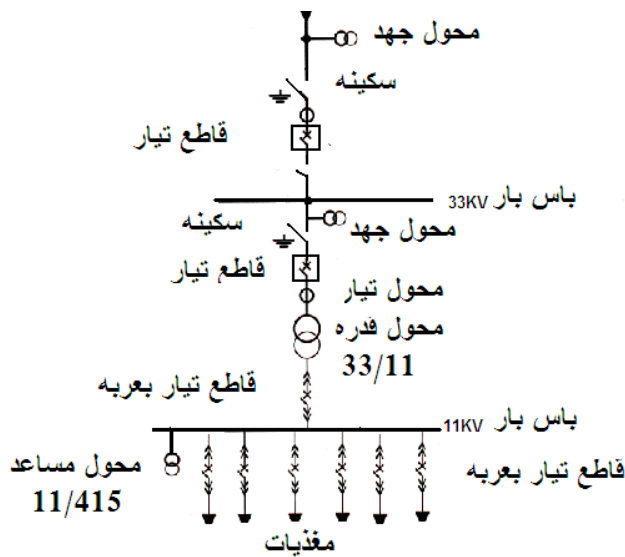


Figure 18-8 Single BB

1- الـ Single BB ، وهو

أبسط نظام مستخدم كما

في مخطط الـ SLD (شكل

18-8) الذي يمثل محطة

توزيع فرعية ، حيث يغذي

المحطة موزع رئيسي واحد.

ويعيب تلك الأنواع من

التوصيلات أنه في حالة

عطل المحول أو قضبان

التوزيع تنقطع التغذية عن

جميع الأحمال.

2- لتفادي حدوث الفصل التام للأحمال في الشكل السابق يتم استخدام محولين سعة كل محول منهما تبلغ % 70 من سعة المحطة ، وأيضا يمكن استخدام Double BB مقسم إلى جزئين لكي يعطى مرونة في التشغيل (شكل 18-9).

و يتميز هذا النظام بقلة قيمة تيار القصر نسبيا. ويتميز أيضا بأنه عند وجود عطل بمحول يتم نقل الأحمال إلى المحول الآخر. وهذا يعني اعتمادية عالية. وأيضاً في حالة وجود عطل أحد الـ BBS يتم نقل الأحمال إلى الآخر، وبذلك نكون ضمناً سهولة في التشغيل وتقليل قدر المستطاع في فترة انقطاع التغذية.

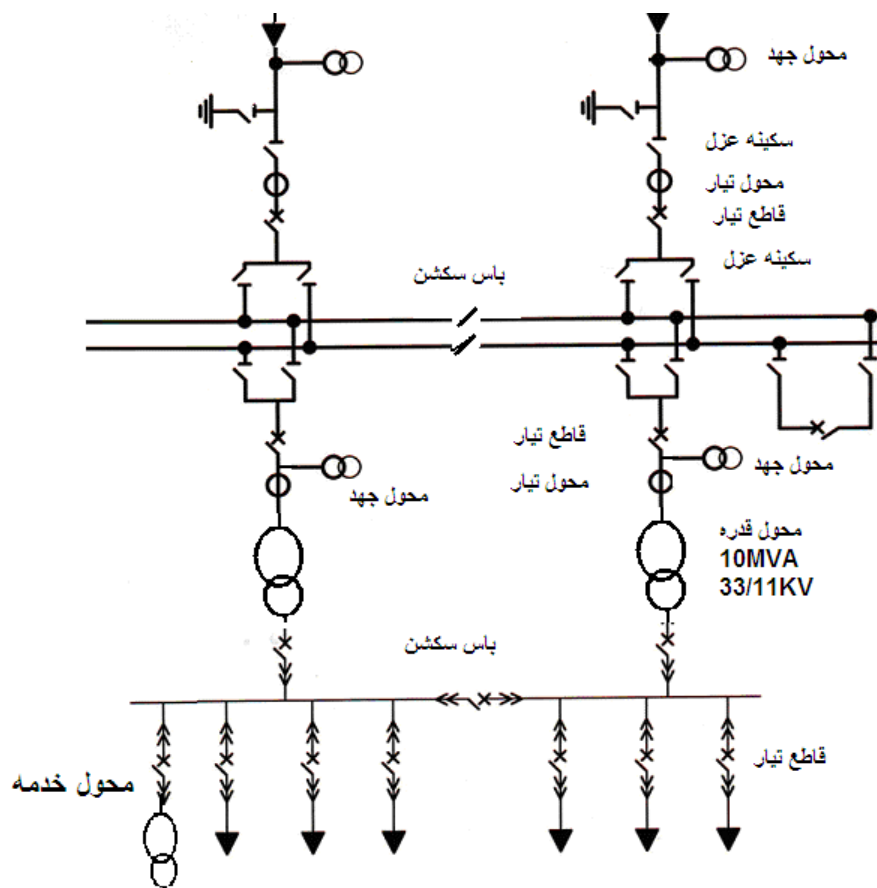


Figure 18-9 Double BB in HV side

19

العناصر الأساسية بشبكة التوزيع

عناصر منظومة التوزيع تتضمن ما يلي :

- 1- الموزعات Distributors .
- 2- محولات التوزيع.
- 3- لوحات الربط الحلقى الـ RMU ، والربط مع شبكة الجهد المنخفض
- 4- عناصر خاصة بشبكات التوزيع الهوائية

والعناصر الثلاثة الأول سيتم دراستهم في هذا الفصل ، بينما يخصص الفصل التالي لدراسة عناصر الشبكات الهوائية. وفيما يلي تعريف مختصر ومعلومات عامة عن العناصر السابقة قبل البدء في دراستها بصورة تفصيلية.

- 1- العنصر الأول في هذه المنظومة هو الموزعات Distributors . وهي عبارة عن لوحات توزيع للجهد المتوسط ، وهي أول نقطة في شبكة توزيع الجهد المتوسط ، حيث تستقبل كابلات المغذيات (جهد متوسط) من محطات التحويل الرئيسية ، ثم تخرج منها كابلات تغذية لمحولات التوزيع المنتشرة في المدينة (جهد متوسط أيضا).
- 2- العنصر الثاني هو محولات التوزيع ، وهي محولات قوى تتراوح قدرتها بين عدة عشرات من الـ kVA وتصل حتى 10MVA ، ويكون جهدها في ناحية الابتدائي إحدى قيم الجهد المتوسط السابقة (3.3 kV - 6.6 kV - 11 kV - 22 kV - 33 kV) ويكون جهدها في ناحية الثانوي 400 فولت. وبالتالي فهي تختلف عن محولات القوى الموجودة في منظومة النقل في قيمة القدرة (قدرة المحولات في شبكة النقل تبدأ من 10 MVA وتصل إلى مئات الـ MVA) وتختلف أيضا في الجهود. وسيكون الحديث عن محولات التوزيع هنا مقتضبا ، حيث يمكن الرجوع لكتابي المرجع في محولات القوى الكهربائية لمن يريد التفاصيل. لكن سأعرض هنا فقط بعض المعلومات التي لم تذكر في الكتاب السابق وأهمها حماية المحولات صغيرة الحجم باستخدام الفيوزات.

3- العنصر الثالث فى المنظومة هو لوحات الـ RMU وهى وحدة الربط بين المحول وبين بقية المحولات فى الشبكة من جهة الجهد المتوسط . ويرتبط بها أكشاك شبكة الجهد المنخفض للمساهمة فى عمل مناورات تغيير الخطوط.

4- العنصر الرابع هو شبكة كابلات الجهد المتوسط الهوائية وتضم الأبراج والعوازل والموصلات والسكاكين ومناعات الصواعق إلخ.

19.1 ضخامة منظومة التوزيع

تمثل منظومة التوزيع أكثر من 50% من إجمالى رأس المال لمنظومة القوى الكهربائية ككل ، ويرجع هذا إلى انخفاض الجهود فى شبكات التوزيع وارتفاع التيارات وبالتالي استخدام عدد كبير من الكابلات والمحولات والأكشاك والمهمات المختلفة بالإضافة إلى ضرورة استخدام أطوال كبيرة من الكابلات للوصول للمستهلكين ، وهذا يفسر أهمية العناية بمنظومة التوزيع من حيث التصميم والتركيب والتشغيل والصيانة.

وأحد أهم الاختلافات بين شبكتى النقل والتوزيع هو الاختلاف فى أعداد المهمات (المعدات) فى نفس المساحة الجغرافية. ففى شبكة النقل ربما لا تجد فى مساحة جغرافية طولها مثلا 20 كم أكثر من بضع مئات من أبراج النقل وربما محطة محولات واحدة ، وقد لا تجد. بينما فى نفس هذه المساحة داخل مدينة سكنية ستجد شبكة التوزيع تحتوى على عشرات الموزعات ومئات المحولات و الآلاف من أكشاك الجهد المنخفض ، إلخ).

واللوحة التالية شكل 1-19 تبين الحجم الضخم لمهمات هذه الشبكة فى مركز تحكم واحد فقط (تحكم مدينة نصر) بمدينة القاهرة ، فهذا المركز مسئول عن 53 موزع تغذى حوالى 2500 محول من خلال شبكة كابلات يصل إجمالى طولها إلى حوالى 2800 كم . وهذا كله فى حى واحد فقط ضمن أحياء مدينة القاهرة.

هذه الموزعات (الـ 53 ، والتي تغذى 2500 محول) تأخذ تغذيتها من:

- عدد 3 محطات تحويل (محطات نقل) جهد 11/66/220 ك ف ، وهى : محطة محولات الاستاد ، ومحطة محولات الشرق ، ومحطة محولات صقر قريش.
- ثم عدد 8 محطات تحويل جهد 11/66 ك ف ، (محطات توزيع ابتدائية) وهى محطات محولات : الزهراء ، والمقطم ، والمروة ، ومدينة نصر ، والهجانة ، والنزهة ، والجبل الأخضر ، ورابعة العدوية.

والمحولات (الـ 2500) الموجودة بهذه الشبكة معظمها داخل مباني (سواء حكومية أو خاصة) ، كما يوجد عدد 361 محول داخل أكشاك محولات فى الشارع مباشرة.

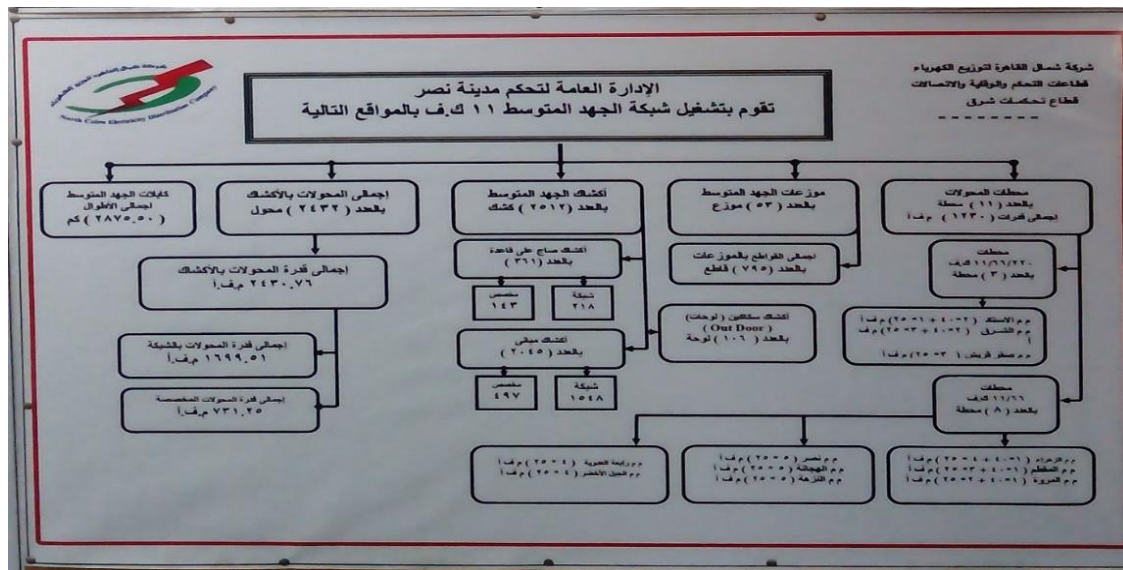


Figure 19-1 مكونات شبكة التوزيع في تحكم مدينة نصر

وفيما يلي سندرس بالتفصيل أهم خصائص عناصر شبكة التوزيع التي ذكرناها إجمالاً في هذه المقدمة.

19.2 العنصر الأول في منظومة الجهد المتوسط: الموزع

19.2.1 المهام داخل مبنى الموزع Distributor

كما ذكرنا ، فالموزع هو نقطة البدء في شبكة الجهد المتوسط ، وكل موزع مسئول عن تغذية مجموعة من المحولات في المنطقة المحيطة به ، وفي الغالب لا يوجد محولات داخل مبنى الموزع نفسه ، وإنما فقط كابلات جهد متوسط دخول وخروج ، وإن كان هناك بعض الموزعات التي يوجد بها محول خدمة بقدرة 25 kVA .

والموزع ليس إلا مجموعة من خلايا توزيع جهد متوسط متصلة ببعضها البعض عن طريق قضبان نحاسية كما في الشكل 19-2 الذى يظهر فى جزئه العلوى مخطط مبسط للموزع ثم فى الجزء السفلى الصورة الحقيقية لخلايا الموزع. والموزع يستخدم لاستقبال القدرة الكهربائية من محطات المحولات الرئيسية عبر كابلات جهد متوسط بقدرات وجهود مختلفة وتوزيعها على محولات التوزيع الثانوية بقدرات وجهود مختلفة.

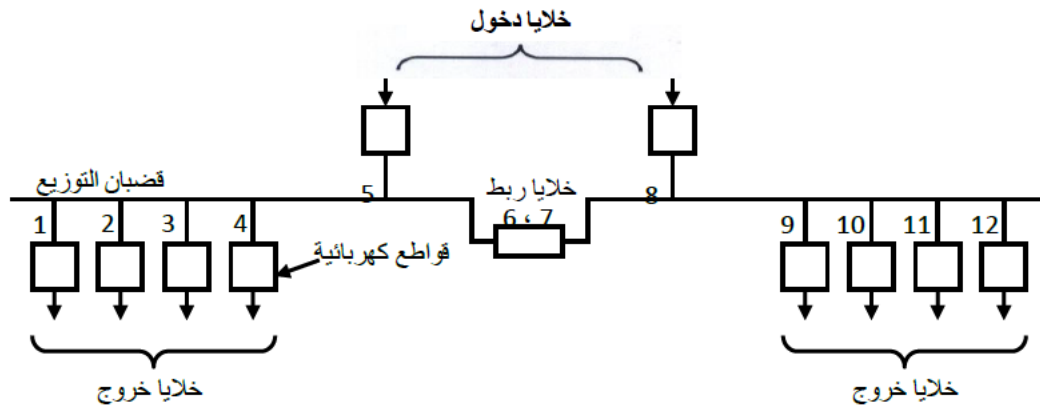
وبداخل مبنى الموزع هناك عدة مهام :

- 1- لوحة التوزيع (الموزع).
- 2- مهام جهد منخفض ، وتشمل البطاريات وشواحن البطاريات
- 3- منظومة الاتصالات والتحكم (غالباً لاسلكي)
- 4- مهام الأمن الصناعى للوقاية من الحرائق

وفى الجزء التالي سنشرح بالتفصيل الأجزاء الخاصة بلوحة الموزع وهى كما ذكرنا تمثل العنصر الرئيسى بالمبنى.

19.2.2 لوحة التوزيع (الموزع)

تتكون لوحة الموزع من خلايا متجاورة كما فى الصورة شكل 2-19، وتكون الخلايا مثبتة على بارات حديدية على ارتفاع كاف من سطح الأرض من أسفل لسهولة ربط الكابلات بها . ويتم تجهيز وضع لوحة الموزع بالشكل المناسب بحيث لا يتعارض مع حرية الحركة والدخول للمعدات داخل المبنى، لذلك يراعى وضع اللوحات بجوار الجدران دون ملاصقة لها حتى يمكن لفرق الصيانة فتحها من الخلف أثناء عمليات الإصلاح والصيانة بسهولة وإدخال معدات الصيانة كما فى الصورة.



مخطط الموزع وصورته Figure 19-2

ويراعى أيضا وضعها بعيداً عن الأبواب الرئيسية والفرعية ومنافذ الهروب وبعيداً عن أماكن المعدات التي تحدث اهتزازات وكذلك إبعادها عن خطوط أنابيب المياه بأنواعها وأنابيب الغازات. وتركب اللوحة على قاعدة أسمنتية مرتفعة عن مستوى أرضية المبنى حماية لها من المياه أثناء عمليات التنظيف ويتم أيضا تجهيز مجارى للكابلات أسفل اللوحات لسهولة توصيل الكابلات الكهربائية بها حيث يوجد بدروم أسفل الخلايا لتمديد الكابلات.

وبصفة عامة تحتوى لوحة الموزع على عدة أنواع من الخلايا:

- 1- خلايا الدخول (الشائع في مصر استخدام ٤ خلايا دخول)
- 2- خلايا الخروج (الشائع ٨ خلايا خروج)
- 3- خليتين لرباط القضبان ، أحدهما للـ Bus Riser والأخرى خاصة بالـ Bus section, BS
- 4- خلية القياسات وتأريض البارة (Bus Metering and Bus Earthing): ويوجد بها محول جهد VT للبارة يغذى جميع أغراض خلايا الخروج على نفس هذه البارة لأنه غالبا لا يوجد VT مستقل لكل Outgoing لتقليل التكلفة. كذلك يوجد بها أجهزة Voltmeter للبارة ويوجد بها كذلك سكينه التأريض للبارة.
- 5- خلية تغذية المحول المساعد لمحطة التوزيع (Auxiliary Transformer Cubical): وهى خلية لتغذية المحول المساعد وتشبه تماما خلية الخروج العادية لكن يزيد عليها فقط وجود بعض الـ auxiliary/lockout relays الخاصة بالوقاية الميكانيكية للمحول.
- 6- توجد أيضا خلية تغذية مكثفات تحسين معامل القدرة التى تكون مركبة على قضبان الـ kV11 ، وتسمى Capacitor Bank Cubical ، وتشبه خلايا الخروج تقريبا.

ملاحظات:

- عادة تكون هناك دائرتى تغذية فقط (كل دائرة تغذى نصف الـ BB) إذا كانت كل دائرة منهما قادرة على تغذية كامل الأحمال المغذاه من الموزع. أما إذا كانت الأحمال الكلية للموزع أكبر من قدرة دائرة تغذية واحدة فإن الأمر يقتضى استخدام أربع دوائر تغذية وبالتالي يكون عدد خلايا الدخول للموزع أربعة.
- يفضل وجود أربعة مغذيات كل اثنان منهما يغذيان نصف الموزع لضمان استمرارية الكهرباء عند حدوث عطل فى أى من مغذيات الدخول فى أى نصف ، ويفضل أن تكون تغذية نصف الموزع مختلفة عن النصف الآخر بحيث يكونا من محطات محولات ابتدائية مختلفة ، أو من محولات مختلفة داخل نفس المحطة.
- خلايا الخروج يكون عددها مساو لعدد دوائر الخروج مضافاً إليها الخلايا الاحتياطية.
- ولأن الموزع مكون من قسمين فنحن نحتاج إلى ربط القسمين معا بواسطة خلايا الربط Bus Coupler التى تتكون من خليتين إحداها خاصة بقاطع الربط CB Coupling لربط جزئى قضبان التوزيع والأخرى تسمى بالـ Bus Riser ، وهذه ليس بها CB ، وإنما يتم فيها فقط استبدال البارات برفع

قضبان التوزيع من مستوى أطراف الخروج الخاصة بقاطع الربط إلى مستوى القضبان في الموزع كما في الشكل 19-3

- ويجب مراعاة وجود Interlock (ميكانيكى/ كهربى) – (يدوى/ تلقائى) ، بين خلايا الدخول من خلال خلية الـ Bus Section.

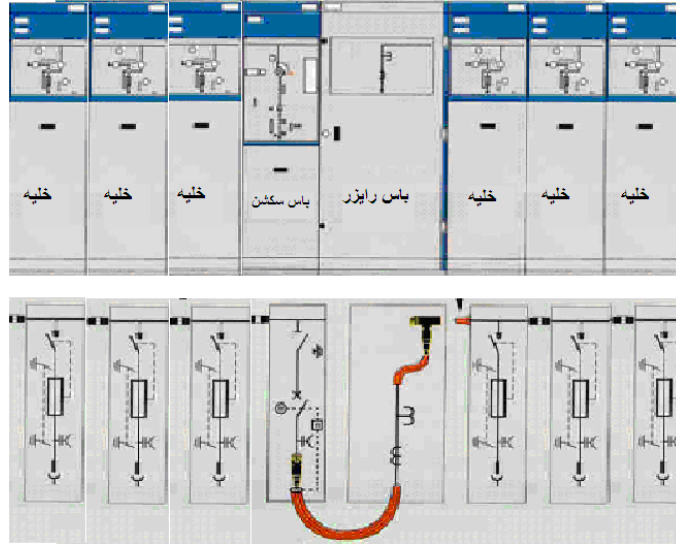


Figure 19-3 خلايا الموزع

19.2.3 مكونات الخلية

كل خلية من خلايا الموزع سواء كانت خلية دخول أو خلية خروج تتكون - من حيث الشكل الخارجى - من ثلاث أقسام كما في الشكل 19-4:

1. القسم العلوي : وهو خاص بأجهزة الجهد المنخفض (110 فولت) وتضم أجهزة القياس والحماية
2. القسم الأوسط : وهو و خاص بوسائل الفصل والتوصيل أي مكان تركيب القاطع وفقا لنوعه وكذلك يمر من خلاله قضبان التوزيع التي هي عبارة عن قضبان نحاسية تأخذ أشكالا مختلفة وذات مساحة مقطع مختلفة حسب الحمل التصميمي و تكون موزعة بطريقة يسهل ربطها مع القاطع .
3. القسم السفلى : وهو مكان خاص بدخول وتركيب الكابلات كما يحتوى أيضا على محول جهد ومحول تيار .

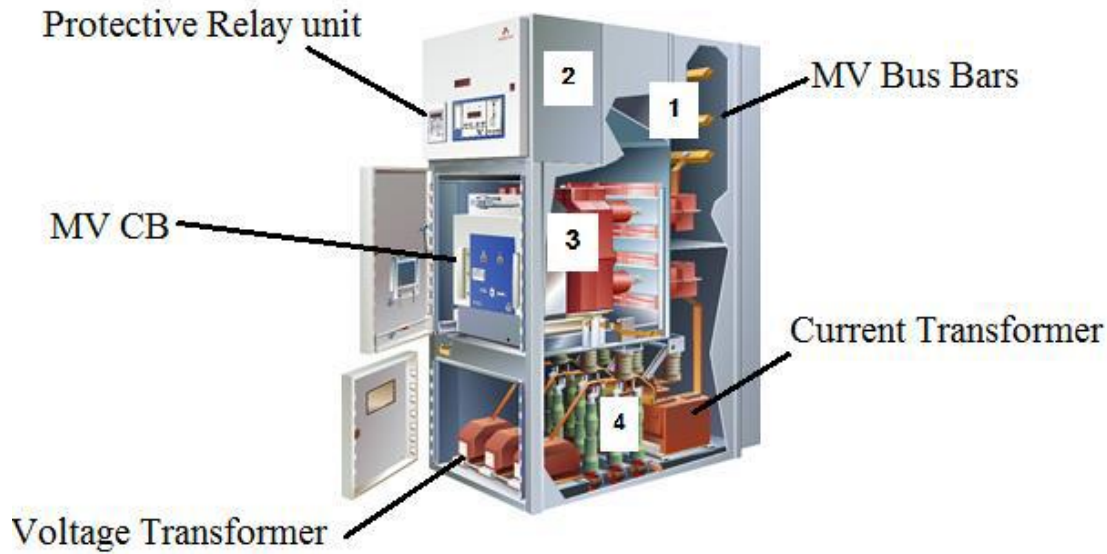


Figure 19-4 تفاصيل خلية في الموزع

19.2.4 المهام الموجودة داخل خلية الدخول Incoming Cubicle

تحتوى خلية الدخول على العناصر التالية : (الأرقام الواردة تمثل نموذجاً فقط وليست موحدة ولكن غالباً)

- 1- قاطع تيار جهد متوسط MV-CB ثلاثى الأوجه سعة 1250A .
- 2- سكينه أرضى موصلة بشبكة التأريض.
- 3- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر لتشغيل دوائر الفصل والتشغيل للقاطع.
- 4- كابلات الدخول بمساحة مقطع 3*(1*400) أو 3*300
- 5- عدد 3 " محولات تيار (5/5/400) يستخدم كل واحد منهم مع Phase من الـ 3-phases ، لتغذية أجهزة الوقاية والقياس.
- 6- عدد 3 " أميتر لقياس التيار بالأمبير
- 7- عدد 3 " محول جهد $\frac{11000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}}$
- 8- عداد طاقة فعالة وغير فعالة
- 9- مبين وضع القاطع ومبين وضع لسكينه الأرضى.
- 10- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع
- 11- أجهزة الحماية وتشمل:

- Over current Relay حماية ضد زيادة التيار
- Earth Fault Relay حماية ضد تسرب الأرضى
- Directional Over Current Relay حماية ضد زيادة التيار الاتجاهى
- Directional Earth Fault Relay حماية ضد التسرب الأرضى الاتجاهى

- إنترلوك ميكانيكى بين سكينه الأرضى وبين القاطع يمنع توصيلهما معا.

19.2.5 المهام الموجودة بخلية الخروج: Cubicle Outgoing

تحتوى خلية الخروج على العناصر التالية:

- 1- قاطع تيار جهد متوسط ثلاثى الأوجه سعة 630 أمبير أو 1250 أمبير
 - 2- سكينه أرضى موصلة ببار الأرضي
 - 3- دوائر الكنترول التى تعمل بالتيار المستمر الخاص بتشغيل دوائر الفصل للقاطع
 - 4- كابلات الخروج ومقطعها 3*150 أو 3*240 ملم
 - 5- عدد 3 " أميتر لقياس التيار بالأمبير
 - 6- عدد 3 محول تيار وفى الغالب تكون 5/5/200
 - 7- مبين وضع القاطع ومبين وضع لسكينه الأرضي.
 - 8- لمبات بيان حالة فصل وتوصيل القاطع
 - 9- أجهزة الحماية وتشمل :
- Over current Relay حماية ضد زيادة التيار
 - Earth Fault Relay حماية ضد تسرب الأرضي

لاحظ أن خلية الخروج تحتوى على CT فقط ولا تحتاج إلى VT بسبب عدم وجود Directional relay فى دوائر الخروج (هناك حالات خاصة يوجد بها VT إذا احتوت الخلية على عداد قياس الطاقة لمشارك معين) .

19.2.6 المهام الموجودة بخلية الربط :

يوجد خليتين للربط تحتوى الأولى على المهام التالية:

- القاطع سعة 1250A
 - جهاز وقاية ضد زيادة التيار والتسرب الأرضي
- أما الخلية الثانية فهي خلية استبدال بارات فقط كما ذكرنا.

19.2.7 مخطط لوحة الموزع

دائما تظهر التفاصيل الفنية الداخلية الخاصة بلوحات الموزعات على SLD كما الشكل 19-5 الذى يظهر لوحة تتكون من 14 خلية (K1-K14) ، بعض هذه الخلايا تكون خلايا دخول للكابلات المغذية للوحة (K5,K6,K9,K10) ، والباقي خلايا خروج لتغذية المحولات المنتشرة بالمنطقة ، ماعدا الخليتان رقم K7, K8 فيمثلان رابط القضبان . وجميع الخلايا لها نفس الجهد.

ويمكن أن ترى أن خلايا الدخول مقسمة إلى مجموعتين ، فهناك الخليتان 5 و 6 موصلتان على نصف الموزع وقادمتان من مصدر مختلف عن الخليتين 9 و 10 اللتان تغذيان النصف الثانى من الموزع . و لا يتم الربط

بينهم أبدا إلا في حالة خروج أو توقف إحدى الجهتين عن الخدمة. لاحظ أيضا أن خلايا الخروج تربط بين الموزع وبين المحولات الموجودة بالمنطقة (11KV / 400V) .

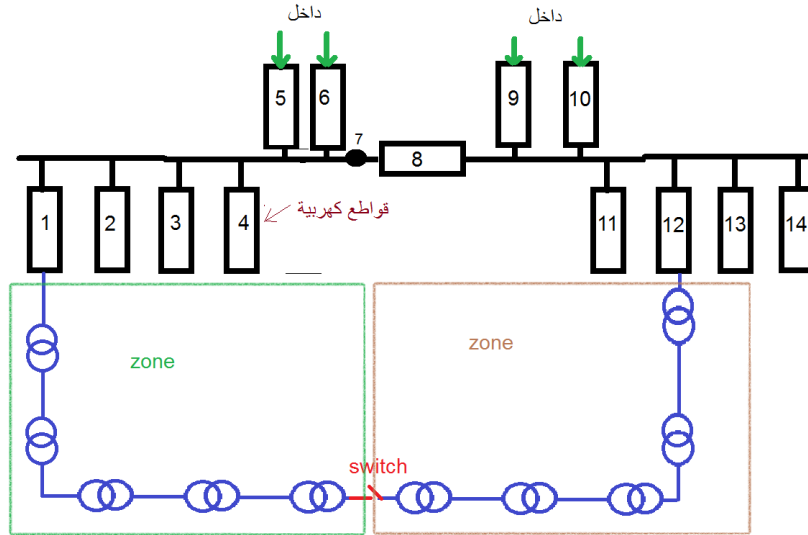


Figure 19-5 Ring system

و يتم توصيل المحولات على شكل Ring فيتم توصيل كل مجموعة محولات مغذاة من إحدى خلايا القسم الأيمن بمجموعة محولات مغذاة من خلية أخرى في القسم الأيسر ويتم التوصيل بينهم بـ Switch يكون مفتوحا دائما (ويسمى بسكينة فتح المنتصف) و لا يغلق إلا في حالة حدوث عطل في إحدى الخليتين أو عطل في الكابلات بين المحولات و ذلك من أجل استمرار التيار حتى يتم إصلاح العطل.

19.3 المهمات الأخرى الموجودة بمبنى الموزع:

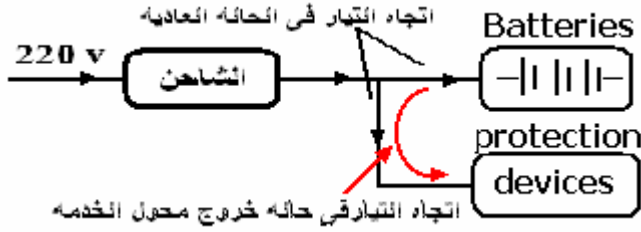
19.3.1 البطاريات:

وهي تقوم بإمداد أجهزة الحماية بالفولت المناسب وكذلك تغذية ملفات الفصل والتوصيل بالقواطع ، وتغذية لمبات البيان و إضاءة لمبات الطوارئ من خلال ريلاي مساعد في حالة انسحاب الجهد عن الموزع. علما بأن هناك نوعين للبطاريات:

- حمضية : وعمرها الافتراضي صغير ويتراوح بين سنة واحدة و5 سنوات حسب عدد مرات الفصل والتشغيل ، وجهد البطارية الواحدة 12 فولت ، وغالبا لا تستعمل مع الموزعات.
- قلوية : وعمرها الافتراضي يصل إلى ٢٠ سنة وهي الأكثر استعمالا ولاسيما النوع الليثيوم وجهد العمود 1.2 V .

ملحوظة: راجع الجزء الخاص بالبطاريات في الباب الثالث (محطات التحويل) لمزيد من المعلومات.

19.3.2 الشاحن (التونجر)



ودوره هو شحن البطاريات وتغذية أجهزة الوقاية طالما كان يتغذى من خلال محول الخدمة الموجود بمبنى الموزع. فإذا خرج محول الخدمة تصبح التغذية من البطاريات كما في الشكل 19-6.

Figure 19-6 توصيل الشاحن

(هناك أكثر من خطأ في الصورة شكل 19-7 الخاصة بغرفة البطاريات. هل يمكنك تحديدهم؟)



Figure 19-7 غرفة البطاريات

19.3.3 ما معنى انسحاب الجهد على الموزع؟

- إذا حدث فصل كامل لمحطة التوزيع فعلى مهندس التشغيل التأكد من سبب الفصل على النحو التالي :
- 1- مراجعة الريلاى الخاص بمغذيات الدخول للمحطة ، فإذا لم يجد أي خطأ فهذا يعنى أنه لا توجد مشكلة في مغذيات الدخول للمحطة.
 - 2- فحص قراءة عدادات مغذيات الدخول للمحطة فإذا وجد أنها أصفار و القاطع في وضع تشغيل فهذا يدل ذلك على أن السبب في فصل المحطة هو سبب خارجي (تسمى بحالة انسحاب الجهد).
- في هذه الحالة على مهندس التشغيل فصل كل مغذيات الخروج دون انتظار لأمر من التحكم. ماعدا محول الخدمات فيبقى في وضع تشغيل ثم عليه بالاتصال بمهندس التحكم لإخباره بما حدث ، وعلى مهندس التشغيل بالموزع مراقبة عدادات الجهد لمغذيات الدخول حتى يكون على استعداد لإرجاع الأحمال مرة أخرى.
- 3- بعد التأكد من رجوع الجهد على مغذيات الدخول و في نفس الوقت بعد أخذ التصريح من مهندس التحكم عليه أن يقوم بإرجاع الأحمال بتوصيل قواطع مغذيات الخروج الـ 11 kV واحد تلو الآخر حتى يتم التشغيل بأمان.

19.3.4 التحكم في لوحات الجهد المتوسط

ما تم شرحه حتى الآن هو لوحات موزعات الجهد المتوسط العامة التابعة للدولة ، لكن في المشروعات الكبرى يكون لدى كل مشروع لوحة موزع خاصة به ، وهى تشبه من حيث الوظيفة والتركيب اللوحات التى تحدثنا عنها لكن أحيانا تكون أقل في عدد الخلايا ، فالمشروع قد يكون مغذى مثلا من 4 أو 5 محولات فقط . ويكثر في لوحات الجهد المتوسط الخاصة وجود لوحتى تحكم هما:

- 1- لوحة تحكم خاصة بالمكثفات وهى Automatic Capacitor Control System, ACCS ويتم عن طريقها التحكم في دخول وخروج المكثفات تلقائيا بناءا على قيمة الـ Reactive Power ، وحسب قيمة الجهد الذى ضبط عليه الـ Setting .
- 2- لوحة تحكم خاصة بالجهد المتوسط تسمى Automatic Bus Transfer Scheme, ABTS وهى تشبه لوحة الـ Automatic Transfer Switch, ATS الموجودة في لوحة الجهد المنخفض. ووظيفة الـ ABTS هى فتح أو غلق رابط القضبان (Bus-Couplers) أوتوماتيكيا.

ولشرح هذه الوظيفة نفترض أن لدينا مثلا 3 محولات جهد 33/11kV متصلين بحيث أن جهد الثانوى لهم يكون موصلا على ثلاث Sections منفصلة في بارة الـ 11kV ، وعندها سيكون لدينا عدد (2) من الـ Bus Sections بين الـ Sections الثلاثة ، وفى الغالب يكون اثنان من المحولات الثلاثة متصلين على التوازي (BS بينهما مغلق) ، والمحول الثالث يكون مغذي للـ Section الثالث منفردا ، وذلك للحد من الـ Short-circuit Level على الـ 11kV .

A. لو حدث عطل على أى محول من الاثنين الموصلين على التوازي وتم فصله ، فستقوم الـ ABTS بالغلق الأوتوماتيكي للـ Bus-Section الثانى لكى يدخل المحول الذى كان منفردا مع المحول المتبقى ليغذيا معا الـ Sections 3 لعدم فقد الأحمال.

B. لو رجع المحول المفصول وصارت المحولات الثلاث على التوازي ، فستقوم الـ ABTS بفصل الـ Bus-Section الثانى لفصل محول لتقليل الـ Short-circuit Level على الـ 11kV.

19.4 العنصر الثانى فى منظومة الجهد المتوسط: محولات التوزيع

تعرف أكشاك المحولات باسم Kiosk (شكل 19-8) . والكلمة تعنى كشك



Figure 19-8

و الكشك يتكون من 3 غرف (شكل 19-9):

1- غرفة Ring main unit

2- غرفة المحول

3- غرفة لوحة التوزيع الرئيسية للجهد المنخفض MLVS

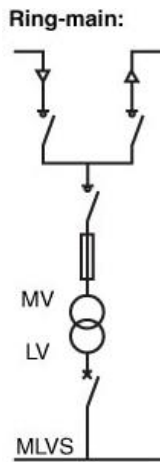


Figure 19-9

و يستخدم الكشك لتغذية مجمع سكنى أو غيره حيث تتصل الـ RMU من جهة بالموزع ، ومن الجهة الأخرى بوحدة RMU أخرى أو تتصل بخلاية أخرى من خلايا الموزع ، ويتصل المفتاح الأوسط من الـ RMU بالمحول الذى يقوم بتحويل الجهد المتوسط 11kV إلى الجهد المنخفض 400 volt فى لوحة توزيع الجهد المنخفض MLVS ، و منها إلى الأحمال المراد تغذيتها .

وقدرات المحولات المستخدمة فى شبكة التوزيع هى :

25 kVA, 50 kVA, 100 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 500 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1250 kVA, 1600 kVA, 2000 kVA

والشكل 10-19 يظهر SLD للمجموعة كلها ، ففي الجزء العلوى منه تظهر الـ RMU وعليها منظومة الحماية الخاصة بها ثم المحول ثم دوائر الخروج إلى أحمال الجهد المنخفض .

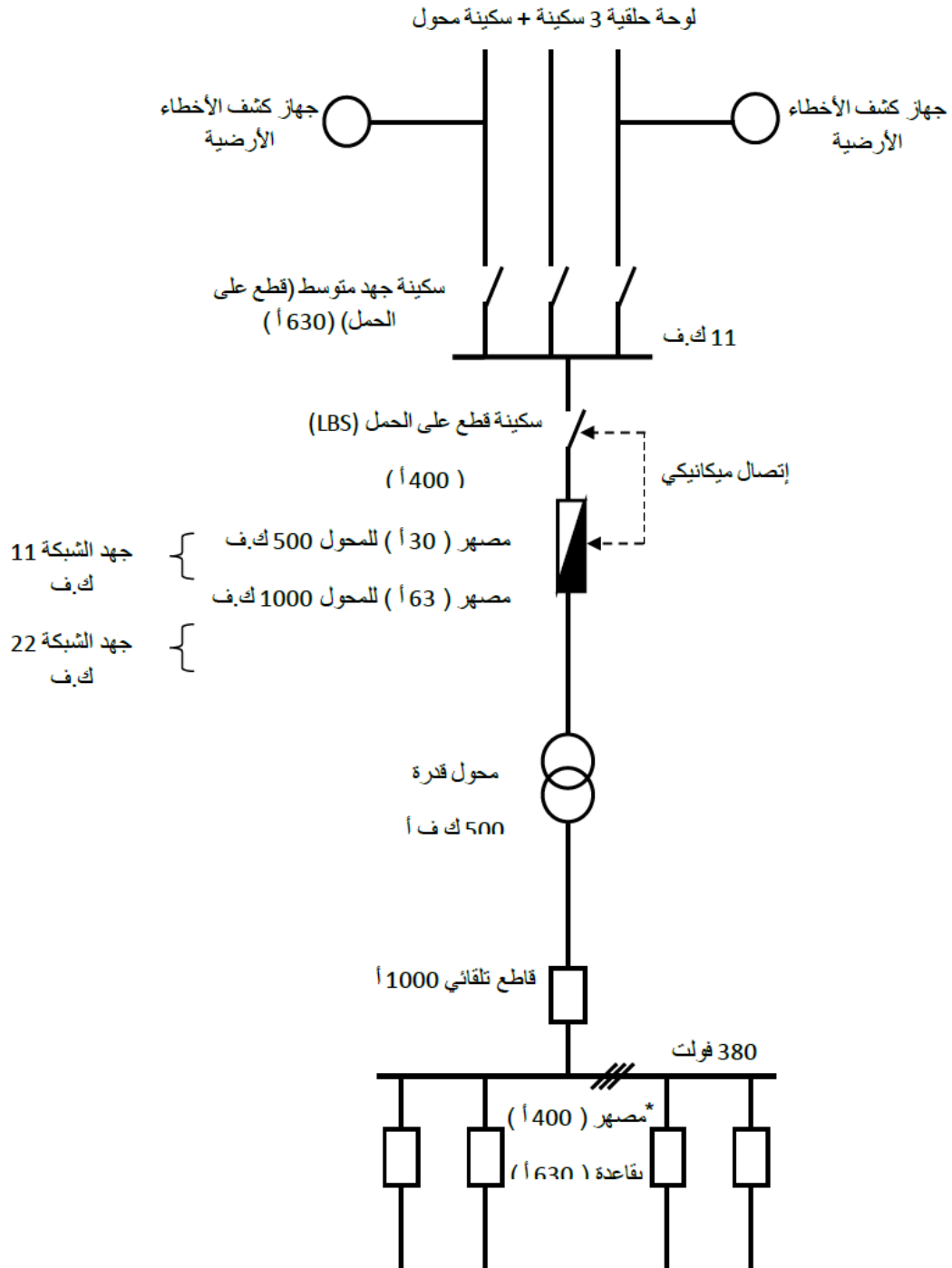


Figure 19-10 Transformer SLD

ويضاف إلى أحمال الجهد المنخفض بعض الدوائر الخاصة بالكشك نفسه وتسمى أحمال الـ single phase وهي :

- 1- اللبنة للمساعدة في إنارة اللوحة في حالة حدوث عطل أو إجراء معاينة من قبل العامل في الموقع
- 2- فيشه socket كمصدر كهربى في حالة الحاجة إلى استخدام جهاز قياس في الموقع أو غيره.
- 3- شفاط مروحة (fan & hood) للتهوية

ومن ضمن دوائر الخروج توجد غالبا دائرة خاصة بتحسين معامل القدرة Power Factor حيث تتصل بمكثف يركب داخل لوحة الجهد المنخفض.

وتختلف ساعات المكثفات على حسب قدرات المحول وكمثال على ذلك:

75 kVAR	محول ١٠٠٠ ك ف أ
45 kVAR	محول ٥٠٠ ك ف أ
25 kVAR	محول ٣٠٠ ك ف أ

والشكل 11-19 يظهر طريقة توزيع العناصر الثلاثة داخل كشك المحول

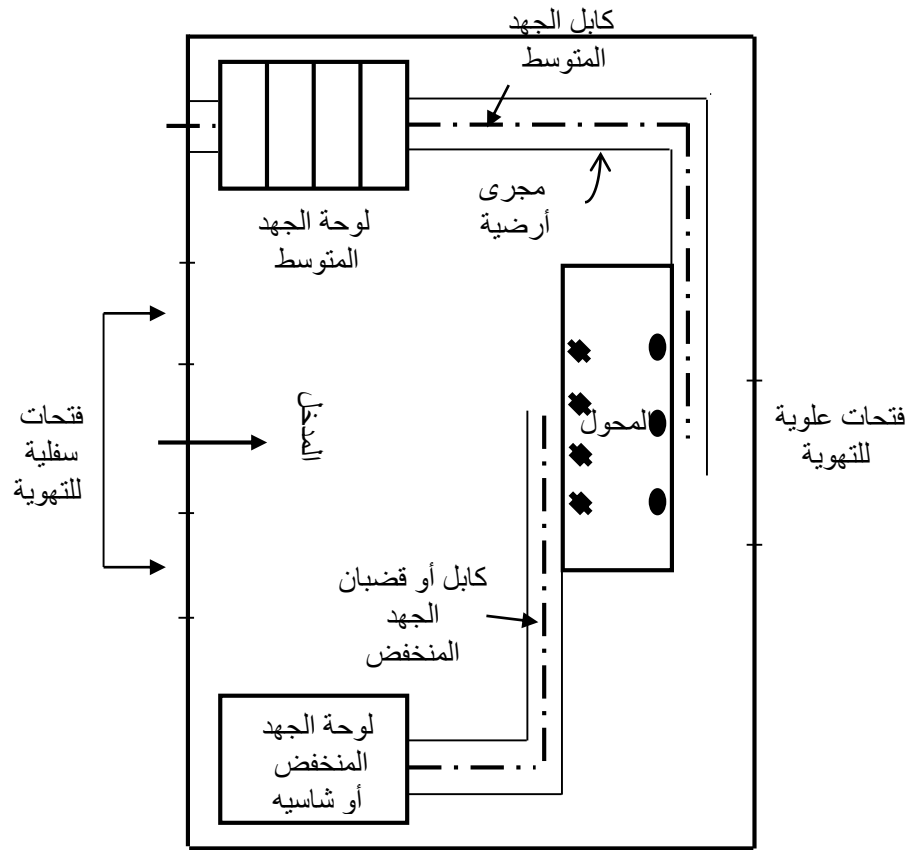


Figure 19-11 غرفة محولات جهد متوسط

19.4.1 استخدام الفيوزات فى شبكات التوزيع

يمكن حماية العناصر الكهربائية بالكشك (المحول والمغذيات) إما باستخدام فيوزات أو باستخدام قواطع CB . وفى الغالب يكون المستخدم جهة الجهد المتوسط هو الفيوزات . وفيما يلي نبذة عن هذا العنصر لأهميته:

19.4.2 ميزات وعيوب الفيوز Fuse

هو جهاز حماية يعمل كقاطع عندما يتجاوز التيار المار القيمة المسموح بها ، فيؤدى ارتفاع درجة حرارة المصهر إلى انصهاره بعد زمن محدد على حسب قيمة التيار المار . وهو يعتبر منظومة حماية متكاملة ، فهو يمكنه الإحساس بالتيارات العالية وبالتالي فهو يقوم مقام محول التيار ، وبعد ذلك يتخذ قرار بالفصل من تلقاء نفسه فيقوم بذلك مقام الريلاى الذى يتخذ قرار الفصل ، ويقوم فى نفس الوقت مقام القاطع الذى يقوم بعملية الفصل ذاتها .

والمصهرات أنواع : منها مصهرات الجهد المنخفض وتركب مع المغذيات الخارجة من المحول ، ومنها أيضا مصهرات الجهد المتوسط التى تركيب قبل محولات التوزيع وتسمى High Rupturing Capacity, HRC .

والفيوز فى الغالب يكون عبارة عن جسم من البلاستيك أو الخزف يحتوى على عنصر قابل للمصهر موصل بطرفى المصهر ويملىء المصهر بمسحوق الكوارتز لاستيعاب درجة الحرارة المتولدة أثناء القصر فلا يحدث له انفجار بسببها .

يتميز الفيوز بسرعة القطع مقارنة بالـ CB حيث يفصل ربما فى ربع دورة (شكل 19-12) بينما يحتاج القاطع

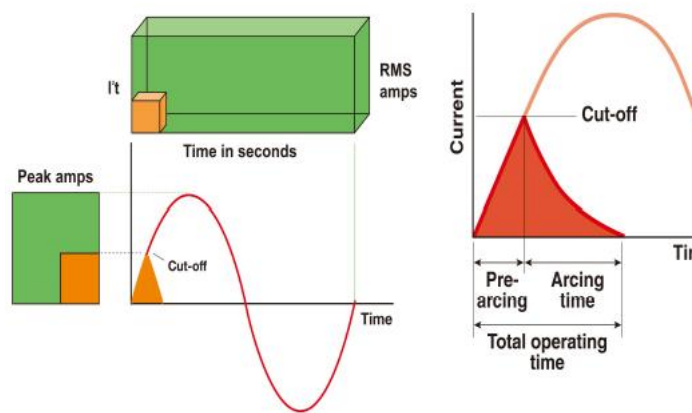


Figure 19-12 Fuse vs CB

إلى دورة كاملة على الأقل ، وهذا يعنى أن الطاقة التى تمر I^2t (let through) خلال الدائرة ضئيلة جدا ولا تسبب مشاكل للعناصر المحمية خلافا للقاطع الذى ربما ينجح فى قطع التيار لكن بعد مرور وقت أطول تكون خلاله كل عناصر الدائرة قد تأثرت بدرجة ما .

لكن أهم عيوب الفيوزات أنه لا يوجد

منها 3-phase وأنها تعمل فقط على 1-phase ، فإذا ركبنا على الفازات الثلاثة وحدث عطل فإنها تفصل لكن ليس فى وقت واحد وقد تفصل فaze واحدة وتترك الاثنين الآخرين وهذا قد يسبب بعض المشاكل .

ونذكر هنا أن الفيوز يعمل فقط على مبدأ Overcurrent Protection ومن ثم لا يصلح إلا لهذه التطبيقات المحددة .

و من عيوب استخدام الفيوز عموما لغرض الحماية أنه لا يتعامل بسرعة مع الخطأ الأرضي وكذلك لا يفرق بين الأعطال العابرة والأعطال المستمرة . ولذلك لا يفضل استخدام الفيوز لحماية الخطوط الهوائية خاصة أن زمن

إعادة التيار مرتفع ، لذلك فإن هذه الفيوزات تستخدم فقط لحماية محولات التوزيع سواء المعلقة على الأعمدة أو الموجودة على الأرض.

19.4.3 أرقام هامة لتوصيف الفيوز

القيمة المكتوبة على الفيوز هي **Rated value** وتمثل قيمة التيار الذى يستطيع تحمله ولا ينصهر عنده أبداً. و يبدأ الفيوز فى الانصهار إذا تجاوز التيار المار خلاله قيمة ما يسمى تيار الصهر **Fusing current** ، والذى غالباً تكون نسبته إلى التيار المقنن تتراوح بين 1.5-4 (تسمى بالـ **Fusing Factor**). بمعنى أن الفيوز 10A لن يبدأ فى الانصهار قبل مرور تيار قدره من 15A-40A تقريباً خلاله.

ويمكن للسهولة استخدام الجدول 1-19 ، حيث تجد هذه النقطة واضحة تماماً ، فأمام كل **Rated current** ستجد قيمة اسمها **min breaking Current** ، فالفيوز 63 أمبير مثلاً لن ينصهر إلا إذا مر خلاله 200 أمبير على الأقل طبقاً لما هو مكتوب بالجدول.

وهناك رقم هام أيضاً هو الـ **Rated breaking current** وهى الخاصة بتحمل أقصى تيار قصر قبل أن ينفجر الفيوز. وهو يساوى 40kA للفيوز السابق.

Table 19-1

Fuse-link Type	Rated Voltage	Rated current	Rated Breaking Current	Min Breaking Current	Switching voltage	Resistance	Weight	Length
	U _n	I _n	I _{ws}	I _{min}	U _m	R± 10%		L
	kV	A	kA	A	kV	mΩ	kg	mm
BWMW-7,2/3,15	7.2	3,15	40	6	<20	650	1,3	192-1
BWMW-7,2/6,3		6,3		19,5		195		
BWMW-7,2/10		10		30		130		
BWMW-7,2/16		16		48		64		
BWMW-7,2/20		20		54		52		
BWMW-7,2/25		25		67		39	2,6	
BWMW-7,2/31,5		31,5		80		31		
BWMW-7,2/40		40		94		25		
BWMW-7,2/56		56		117		16		
BWMW-7,2/63 -1		63		200		15,5	3.6	292-1
BWMW-7,2/80 -1		80		280		11		
BWMW-7,2/100 -1		100		400		8.2		
BWMW-7,2/63		63		150		13,4	5,2	442-1
BWMW-7,2/80		80		200		12,5		
BWMW-7,2/100		100		330		9		
BWMW-12/3,15	12	3,15	46	7.4	<30	920	1,7	292-1
BWMW-12/6.3		63	48	17.8		300		
BWMW-12/10		10		30		200		
BWMW-12/16		16		50		100		
BWMW-12/20		20		64		76		
BWMW-12/25		25	40	70.6		51	3.6	
BWMW-12/31.5		31,5		78		45,5		
BWMW-12/40		40		88		37.2		
BWMW-12/56		56		172		22,5		
BWMW-12/63		63	46	188		21,6	6,1	537-1
BWMW-12/80		80		355		16,7		
BWMW-12/100		100		444		12		

أما زمن فصل الفيوز فيتوقف على مدى الارتفاع في شدة تيار العطل وكلما زاد تيار العطل قل زمن الفصل ، ويمكن معرفته من منحنيات "الزمن - التيار" الموجودة بالشكل 19-13 ، فزمن الانصهار لفيوز 16 أمبير مثلا إذا مر خلاله تيار قدره 100 أمبير يساوي 0.2 sec طبقا لهذه المنحنيات .

مع ملاحظة أن هناك دائما قيمتين هامتين ترتبطان بزمن الفصل ويظهران في الشكل السابق:

- الزمن الأول هو pre-arcing time ، ويسمى أيضا بزمن الانصهار Melting time ، وهو الزمن من بداية ارتفاع التيار وحتى حدوث الشرارة .
- أما الزمن الثاني فهو زمن استمرار الشرارة arcing time .

وأهمية تعريف هذين الزمنين يكمن في أن اختيار مادة المنصهر تتوقف على مجال استخدامه و على الزمن المسموح به لفصل الدائرة بالفيوز ، فكل مادة لها زمن فصل مختلف وبالتالي لها تطبيقات مختلفة.

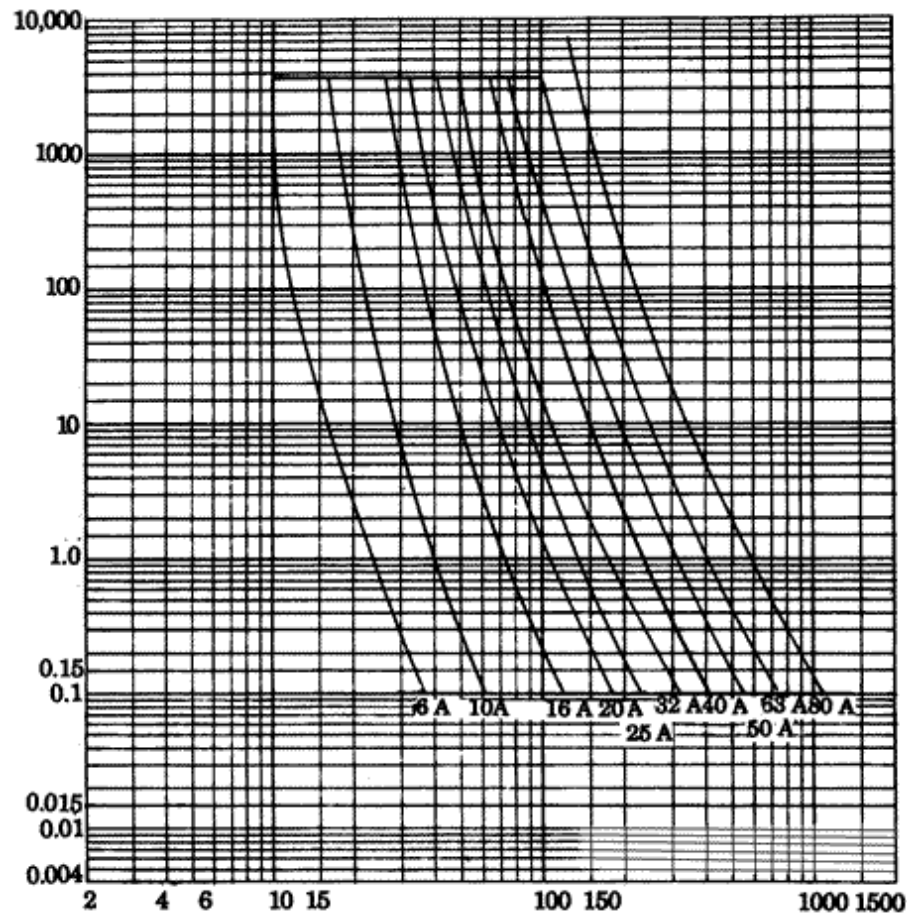


Figure 19-13 Fuse time-current curves

19.4.4 أنواع الفيوزات

1- مصهرات الطرد

ويستخدم هذا النوع من الفيوزات في الأماكن الخارجية وخاصة لحماية الخطوط الهوائية والمحولات المركبة على الأعمدة (الشبكات الهوائية هي الأكثر انتشاراً في أمريكا وكندا من الكابلات) . وتتكون من عنصر صهر داخل أنبوبة لها نهاية مفتوحة ، وعند انصهار عنصر المنصهر يمتد القوس الكهربائي بين طرفي المصهر ، ونتيجة لدرجة الحرارة العالية لهذا القوس تتبخر مادة الأنبوبة ، مما يؤدي إلى انبعاث كمية هائلة من الغازات التي ترفع الضغط داخلها مما يعمل على إطفاء القوس الكهربائي ومنع إعادة اشتعاله .

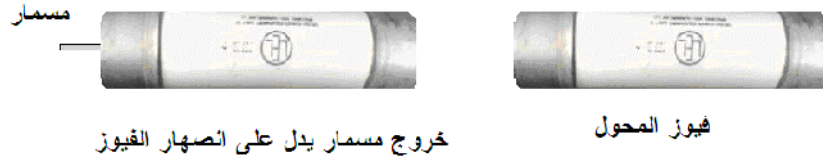
ويتم طرد الغازات بشدة إلى الجو من الطرف الأعلى للأنبوبة حيث تستغل شدة اندفاع الغازات في إسقاط الفيوز بأكمله إلى أسفل بحيث يعطي دليلاً مرئياً على انصهاره . ولا يمكن بطبيعة الحال استخدام هذا النوع داخل المباني بسبب الإزعاج وكمية الغازات الهائلة المنبعثة عند الانصهار .
و الشكل 14-19 يوضح هذا النوع من المصهرات.



Figure 19-14 فيوزات طرد

2- فيوزات الجهد العالي "الخرطوشة"

وأشهر استخداماتها أنها تتركب بداخل الوحدة الحلقية RMU لحماية المحول وتكون بسعة قطع مختلفة وفقا لقدرة المحول. وهذا النوع من الفيوز يوضع بداخل الزيت ويكون الفيوز في وضع سليم ما لم يخرج أي مسمار من إحدى الجوانب أما لو خرج مسمار فيدل على أن الفيوز قد احترق كما الشكل 19-15 ، ويجب أن يركب الفيوز في الاتجاه الصحيح حتى يضمن عند حدوث العطل أن يخرج المسمار من الفيوز ويصدم بميكانيزم داخلي يعمل على فصل المحول.



خروج مسمار يدل على انصهار الفيوز

Figure 19-15

19.4.5 قواعد عامة لاختيار الفيوز المناسب

- 1- يجب أن يكون التيار المقنن للفيوز أكبر من تيار الحمل الأقصى الذي سيمر خلاله. وإلا فإن الفيوز يمكن أن يسخن تحت الظروف الطبيعية وينصهر دون وجود عطل. (معظم أنواع شعيرات الفيوزات المصنوعة من القصدير Type K and T يكون تيار الصهر فيها يساوى تقريبا لـ 150% من تيار الفيوز المقنن).
- 2- يجب أن يكون الجهد مناسباً للشبكة التي سيركب فيها.
- 3- يجب أن تكون سعة القطع Short circuit capacity أكبر من أعلى تيار عطل متوقع مروره (طبقا لحسابات الـ Short Circuit) وإلا سينفجر الفيوز مع الأعطال العالية.

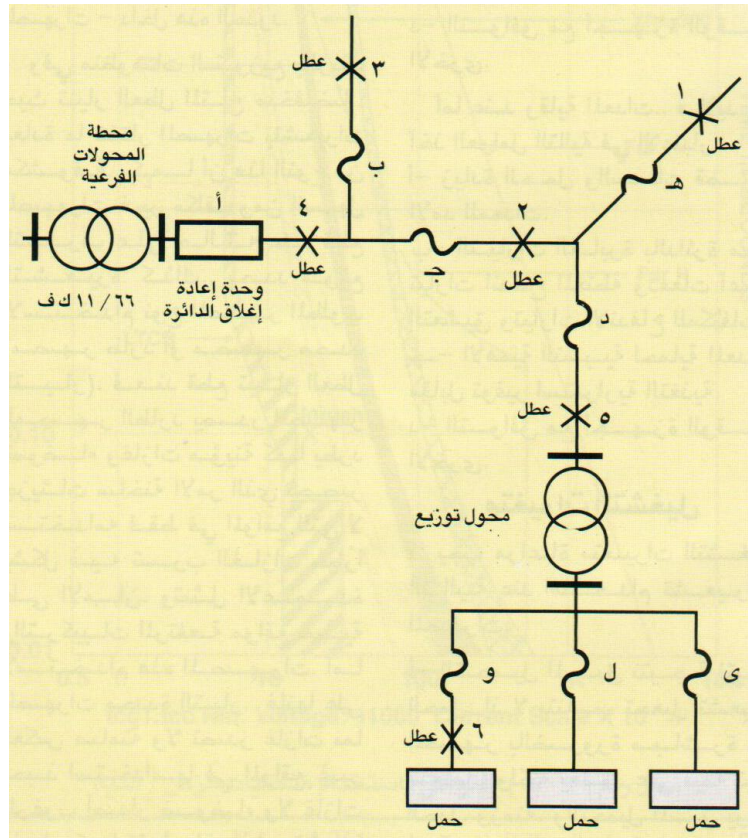
- 4- يجب التأكد من أن الفيوز المختار لن يتأثر بقيم التيارات العالية الطبيعية مثل تيار بدء المحركات أو تيار الإندفاع الـ Inrush في المحولات.
- 5- يجب أن تكون القيمة المختارة لتيار الفيوز متناسقة Coordinated مع الفيوزات التي تليها والتي تسبقها على التوالي.

19.4.6 تنسيق الفيوزات في شبكات التوزيع

عند عمل التنسيق Coordination بين الفيوزات المركبة على التوالي فإننا نستخدم مصطلح فيوز الواقي Protective Fuse للفيوز الأقرب إلى العطل ، بينما نستخدم مصطلح الفيوز المساند Backup Fuse لذلك الفيوز الذى يليه فى اتجاه مصدر التغذية. وبالطبع يجب أن يكون زمن إزالة العطل فى الفيوز الواقي أصغر من الزمن الذى يستغرقه الفيوز المساند (غالبا لا يزيد عن 75% من زمن الفيوز المساند). والهدف الأساسى من عملية التنسيق هو ضمان فصل أصغر قدر ممكن من الشبكة بما يحقق فصل العطل مع استمرارية الخدمة لأكبر عدد ممكن من المستخدمين.

ومن خلال دراسة الشكل 16-19 سنقدم نموذجا لعملية تنسيق الفيوزات واختيار قيمها.

فالشبكة فى هذا الشكل تبدأ بمحطة فرعية والحماية الرئيسية أمامها تشتمل على Recloser وهذا معتاد فى هذه الشبكات بسبب كثرة الأعطال التى تصنف على أنها transient faults ، ثم تبدأ الشبكة فى الامتداد والتفرع كما فى الشكل وفى بداية كل تفرعة يوجد فيوز حماية (ب ، ج ، هـ ، د) ثم هناك فيوزات على الأحمال نفسها (ي ، ل ، و) .



شبكة مصغرة لدراسة موضوع التنسيق بين الفيوزات Figure 19-16

لاحظ أن الجهاز أ يجب أن يتوافق مع الفيوز ب ويتوافق مع ج ، وأن الفيوز ج يجب أن يتوافق مع (هـ ، د) ، والفيوز د يجب أن يتوافق مع الفيوزات (ي ، ل ، و) الموجودة عند الأحمال. فماذا يعني ذلك؟

هذا يعني أنه في حالة حدوث عطل عند النقطة 1 ، فإن الفيوز هـ (الفيوز الواقى) يجب أن يفصل قبل الفيوز ج (الذى يعتبر فيوزا مساندا في هذه الحالة) . أما في حالة العطل عند النقطة 2 ، فإن الفيوز ج (الفيوز الواقى في هذه الحالة) يجب أن يفصل قبل الجهاز أ . وهكذا في حالة العطل 3 يفصل الفيوز ب قبل أ ، وفي حالة العطل 6 يفصل الفيوز و قبل د . إلخ.

وحتى يتم تحقيق هذه المتطلبات فإننا نحتاج إلى عمل عدة الخطوات:

1- **الخطوة الأولى:** إجراء دراسة مفصلة عن حسابات القصر بالشبكة ، ويمكن أن يتم ذلك يدويا في الشبكات الصغيرة ، أو باستخدام البرامج الجاهزة مثل الـ ETAP مثلا.

2- **الخطوة الثانية:** إجراء دراسة عن الـ Load Flow أيضا باستخدام الـ ETAP لتحديد قيم التيارات المارة في كل تفرعة.

وبناء على القيم التي سنحصل عليها من الدراستين السابقتين يمكن اختيار قيم الفيوزات التي تحقق القواعد العامة لاختيار الفيوزات التي ذكرناها في البند السابق ، والتي تحقق أيضا التوافق بين الفيوزات المتتالية.

وحيث أن هذه الحسابات على الـ ETAP تقع خارج نطاق الكتاب ، فسأكتفى بعرض نتائج شبكة صغيرة كما في الشكل 17-19 ، حيث يظهر عند كل فيوز قيمة أكبر وأقل تيار متوقع عند حدوث القصر (داخل دائرة) ، كما يظهر على الفروع قيمة التيار المقنن الذي يمر في الظروف الطبيعية (فوق سهم).

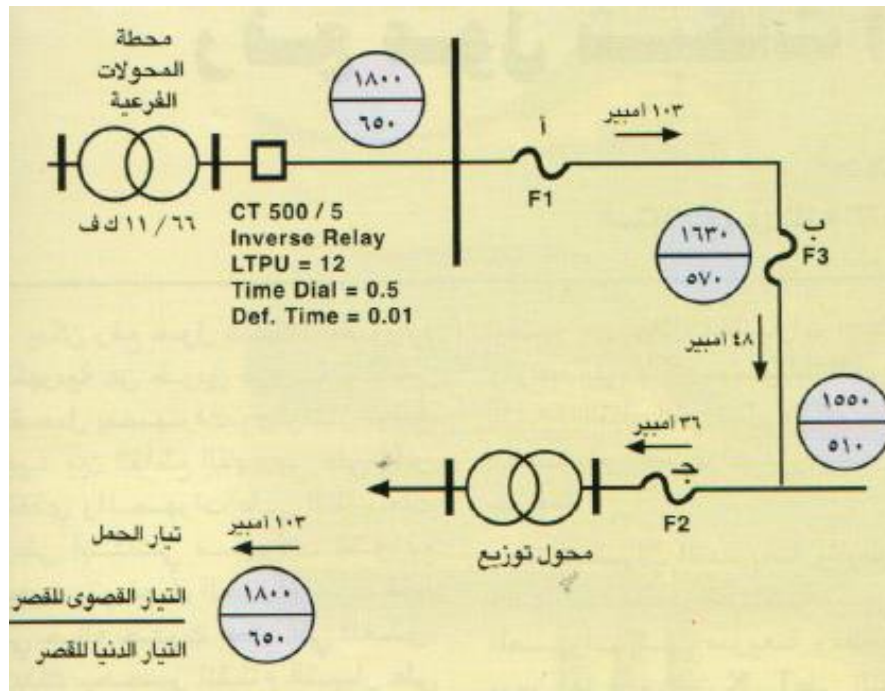


Figure 19-17

ومن خلال هاتين القيمتين اللتين ظهرتا في الشكل 17-19 سيتم اختيار وتنسيق قيم الفيوزات بإحدى طريقتين: إما باستخدام جداول التوافق للفيوزات التي تنتجها كل شركة ، أو باستخدام المنحنيات الخاصة بهذه الفيوزات كما سيتم شرحه تفصيلاً فيما يلي.

الطريقة الأولى : باستخدام جداول التوافق

هذه الجداول يتم استنباطها من منحنيات الزمن/التيار التي أشرنا إليها سابقاً في الشكل 13-19. وكل جدول من جداول التوافق التالية يعطى الحدود التي يمكن أن يتوافق فيها كل فيوز واطئ مع الفيوز المساند (الذي يليه). على سبيل المثال في الجدول 3-19 نجد أن الفيوز الواقي من النوع K له قيم تبدأ من 6A وحتى 140A ، بينما الفيوز المساند له من نفس النوع K له قيم تبدأ من 8A وحتى 200A . فكيف نضمن التوافق بينهما طبقاً لهذا الجدول؟

Table 19-2 Type-K fuse coordination

تشعيرة المصهر المساند														تشعيرة المصهر الواقى
200 K	140 K	100 K	80 K	65 K	50 K	40 K	30 K	25 K	20 K	15 K	12 K	10 K	8 K	
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهر A المصهر B (أمبير)														
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	510	350	190		6 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	650	440	210			8 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1060	840	540	300				10 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	1050	710	320					12 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1340	870	430						15 K
9200	5800	3900	2800	2200	1700	1100	500							20 K
9200	5800	3900	2800	2200	1350	660								25 K
9200	5800	3900	2800	1700	850									30 K
9200	5800	3900	2200	1100										40 K
9200	5800	3500	1450											50 K
9200	5800	2400												65 K
9200	4500													80 K
9100	2000													100 K
4000														140 K

خذ على سبيل المثال الفيوز 20K (الرمز K هنا لا يعنى كيلو وإنما يعنى نوع Type من أنواع الفيوزات) إذا استخدم كفيوز واقى ، فإن الفيوز المساند له يبدأ من 30K ويمكن أن يستمر التوافق بينهما طالما أن تيار العطل أقل من 500 أمبير (نقصد بالتوافق هنا أن الفيوز الواقى يفصل قبل الفيوز المساند) ، بينما يمكن أن نستخدم الفيوز 40K ويستمر التوافق طالما تيار العطل أقل من 1100 أمبير وهكذا.

لاحظ أن هناك أنواعا مختلفة من الفيوزات حسب المادة المستخدمة فى التشعيرة ، فهناك الفيوزات من النوع K الواردة فى الجدول السابق ، وهى فيوزات سريعة الفصل وهناك فيوزات من النوع T وهى فيوزات بطيئة الفصل كما فى الجدول 4-19 ، حيث يمكن أن ترى أن الفيوز 20T (أى 20 أمبير من النوع T) يتوافق مع الفيوز 30T فى مدى يصل إلى 990 أمبير. لاحظ هنا أنه أبداً بكثير من الفيوز 20K الذى يتوافق مع 30K حتى 500 أمبير فقط.

Table 19-3 Type- T Fuse coordination

تشعيرة المصهر المساند													تشعيرة المصهر الواقى
200 T	140 T	100 T	80 T	65 T	50 T	40 T	30 T	25 T	20 T	15 T	12 T	10 T	8 T
أقصى تيار عطل يحمي عنده المصهر A المصهر B (أمبير)													
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	920	680	350	6 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1200	800	375		8 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1500	1100	530			10 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2540	2000	1280	680				12 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2500	1700	730					15 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2100	990						20 T
15200	9700	6100	5000	4100	3200	2600	1400						25 T
15200	9700	6100	5000	3100	1500								30 T
15200	9700	6100	3800	1700									40 T
15200	9700	4400	1750										50 T
15200	9700	2200											65 T
15200	7200												80 T
13800	4000												100 T
7500													140 T

فإذا طبقنا هذا الكلام على الشبكة التي ظهرت في الشكل 17-19 ، نجد أن الفيوز ج مثلا يمكن أن نختار له قيمة تساوى 40T ، وهى قيمة أعلى من التيار الطبيعى خلاله (36 أمبير) وفى هذه الحالة فإن الفيوز ب لكى يتوافق معه يجب أن يكون مساويا 80T وهنا سيكون التوافق مضمونا فى مدى يصل إلى 3800 أمبير ، وحيث أن أقصى قصر يمر بالفيوز ب هو 1630 أمبير فيكون الاختيار مناسباً.

لاحظ أننا لو اخترنا الفيوز 65T فإنه سيكون أيضا متوافقا من الفيوز 40T ولكن المدى يصل إلى 1700 أمبير فقط وهو قريب جدا من قيمة القصر (1630 أمبير) لذا يفضل اختيار القيمة الأعلى.

الطريقة الثانية : باستخدام منحنيات الزمن/التيار

نفس النتائج السابقة يمكن الوصول إليها باستخدام منحني الزمن/التيار لكل فيوز كما فى الشكل 18-19 .

وهذه الطريقة تحتاج أيضا إلى الخطوتين السابقتين (حسابات الـ SC وحسابات Load Flow) فى البداية كما سبق. ثم نستكمل الخطوات كما يلي :

3- الخطوة الثالثة : تحديد نقط الحماية الخاصة بالمحول ، وتشمل نقطتين:

1- نقطة الـ ANSI التى تمثل أقصى تيار قصر يمكن أن يمر بالمحول ، وهو بالطبع التيار الناشئ عن عطل على أطراف المحول مباشرة ، ويمكن حسابه طبقا للمواصفات من المعادلة التالية:

$$I_{ANSI} = \frac{I_{FL}}{X_{PU}} \times 0.58$$

وتتص المواصفات على أن المحول يجب أن يتحمل هذا التيار لمدة 3.75 sec ، أما المحولات الأكبر فإن الفترة الزمنية تصل إلى 4 ثانية . والهدف من تحديد هذه النقطة هو التأكد من أن جميع منحنيات أجهزة الحماية ستكون جميعا أسفل هذه النقطة (بمعنى أن تفصل أجهزة الحماية قبل أن يصل تيار العطل إلى هذه القيمة وهذه المدة والتي لا يمكن للمحول أن يتحمل أكثر منهما).

مع ملاحظة أن بعض الشركات تعطي منحني خاص لكل معدة يسمى منحني الـ Damage Curve بدلا من حساب هذه النقطة ، فإذا تم استخدام هذا المنحني فعندئذ يجب أن تكون كافة منحنيات أجهزة الوقاية تقع أسفله لنفس السبب السابق.

2- نقطة تيار الـ Inrush current وهو التيار المرتفع الذي يمر بالجانب الابتدائي من المحول عند بداية إدخال المحول إلى الخدمة ، وقد تصل قيمته إلى 10 أمثال التيار الطبيعي ، وحيث أنه مرتفع إلى هذه الدرجة فيجب أن نضمن أن جهاز الوقاية المختص بالجانب الابتدائي من المحول لن يتأثر بهذا التيار ، بمعنى أن المنحني الخاص به سيكون أعلى هذه النقطة .

وبعد تحديد القيم الهامة السابقة يتم عمل التنسيق بين منحنيات أجهزة الوقاية المختلفة برسمها على ورق Log-Log ، واختيار مقياس رسم مناسب .

والنقطة الهامة التي يجب أن نشير لها هنا أن لدينا أجزاء من الشبكة تقع في نطاق الجهد المنخفض للمحول وأجزاء أخرى تقع في نطاق الجهد المرتفع ، وقد يكون لدينا أكثر من محول متتالي فيكون لدينا ثلاثة مستويات للجهد ، وفي كل الأحوال يجب أن يتم توقيع جميع القيم في ورقة الرسم منسوبة إلى جهد مرجعي واحد Reference Voltage (وليكن الجهد المنخفض مثلا) ، وتستخدم الـ Turns Ratio للمحول لتحويل قيمة أى تيار إلى ما يكافئها في ناحية الجهد المرجعي الذي تم اختياره.

4- الخطوة الرابعة : توقيع النقط الثابتة التي أشرنا إليها في الخطوة الثالثة على الخريطة منسوبة لجهد الخريطة المرجعي.

5- الخطوة الخامسة : رسم المنحنيات الخاصة بأجهزة الوقاية على الخريطة والتأكد من وجود التوافق بينها. وعند رسم هذه المنحنيات يفضل الآتي:

- يفضل دائما أن تبدأ باختيار المنحني الخاص بجهاز الحماية الأخير (الأقرب للحمل) وأن يكون هذا المنحني جهة اليسار قدر المستطاع على الخريطة ليفسح المجال لرسم بقية المنحنيات التي تليه.
- ثم بعده مباشرة يفضل أن تختار المنحني لأبعد جهاز حماية (الأقرب للمصدر) ، ويجب التأكد أنه يقع أسفل منحني الـ Damage curve للمحول عند المصدر ، لضمان حماية المحول تحت كل ظروف الأعطال .
- ثم بعد ذلك سيتم رسم بقية المنحنيات بينهما.

والشكل 18-19 يعطي نموذجا لنفس الشبكة التي درسناها في الطريقة الأولى (باستخدام الجداول).

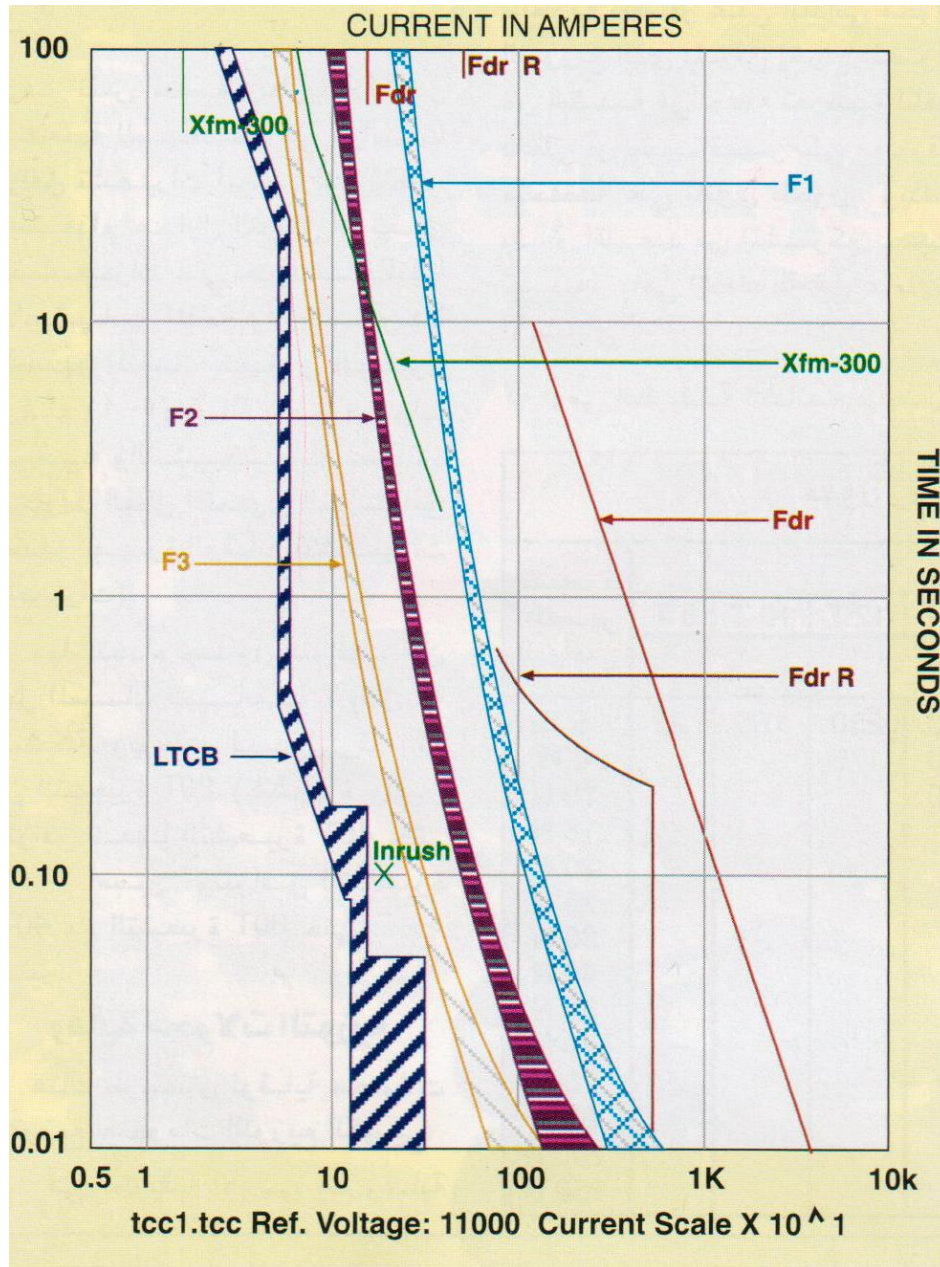


Figure 19-18 coordination curves

19.4.7 ضبط قيم أجهزة حماية محولات التوزيع:

نحن نهدف هنا إلى حساب قيمتين لجهاز الوقاية (سواء كان فيوز أو CB):

1- التيار المقنن

2- سعة القطع

أولا اختيار التيار المقنن لجهاز الوقاية فى جهة الجهد المتوسط:

- بالنسبة للوقاية فى جهة الابتدائى (جهد المتوسط) فإن ما يهمنا هو مراعاة تيار الاندفاع Inrush current ، بمعنى أننا نريد التأكد من أن القاطع / الفيوز لن يتأثر بهذا التيار ولن يفصل المحول بطريق الخطأ. ومن ثم فأنسب CB (إذا استخدم فى هذه الجهة) تكون قيمته فى حدود 6 مرات التيار المقنن ، وحيث أن هذه القيمة عالية جدا وستجعل القاطع مكلفا جدا ، لذا فغالبا لا نستخدم CBS فى ناحية الجهد المتوسط ، ونستبدله بالفيوز .
- فإذا استخدم الفيوز (ناحية الجهد المتوسط) فتكون قيمته المقننة فى حدود 1.2-1.5 من قيمة التيار المقنن للمحول ثم نأخذ أقرب أعلى فيوز بعد هذا الرقم (الفيوز بطئ فى الاستجابة لتيارات الاندفاع كما أن قيمة تيار الانصهار أعلى عدة مرات من قيمة التيار المقنن كما ذكرنا) . ويمكن استخدام الجدول 19-4 لتحديد أنسب فيوز .

اختيار الفيوز المناسب للمحول حسب الجهد والقدرة المقننة للمحول Table 19-4

Transformer rated voltage [kV]	Transformer rating [kVA]																		Fuse rated voltage [kV]		
	25	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		3000	3500
	CEF Fuse-link In [A]																				
3	16	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250 ¹	315 ¹	2x250 ¹	2x315 ¹					
5	10	16	25	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250 ¹	315 ¹	2x250 ¹	2x315 ¹			3.6/7.2
6	6	16	16	25	25	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	250 ¹	315 ¹	2x250 ¹	2x315 ¹		
10	6	10	16	16	16	20	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	2x160	2x200	2x200	
12	6	6	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	160	200	2x160	2x200	12
15	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	2x100	2x125		17.5
20	6	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	2x100	2x100	
24	6	6	6	6	10	10	16	16	16	20	20	25	40	40	50	63	80	100	125	2x100	
30	6	6	6	6	6	10	10	16	16	16	25	25	25	40	40	2x25	2x40				
36	6	6	6	6	6	10	10	10	16	16	25	25	25	40	40	2x25	2x40	2x40			36

IEC 60787

جدول لتحديد سعة فئوز الجهد المتوسط حسب قدرة المحول طبقا للمواصفات الدولية

جدول لتحديد سعة فيوز الجهد المتوسط حسب قدرة المحول طبقا للمواصفات الدولية IEC 60787

- بالنسبة للوقاية جهة الثانوى يفضل أن نستخدم CB قيمته فوق التيار المقنن مباشرة كما فى الجدول 19-5:

استخدام القاطع المناسب لقدرة المحول Table 19-4

قدرة المحول	القاطع (جهد منخفض)
250KVA	400 أمبير MCCB
500KVA	800 أمبير MCCB
1000KVA	1600 أمبير ACB
1500 kVA	2500 أمبير ACB
3200 kVA	3200 أمبير ACB

ملحوظة:

ليس معنى أننا نستخدم فيوز في جهة الجهد المتوسط للمحول أن الفيوز لا يتأثر بتيار الاندفاع ، فالحقيقة أنه يتأثر لكن بدرجة أبطأ من الـ CB . والجدول 6-19 يبين المدى الزمني الذي يتحمله الفيوز نتيجة ارتفاع التيار مؤقتا (سواء بسبب تيار الاندفاع في المحولات أو بسبب تيار البدء Starting Current في المحركات) لاحظ مثلا أن الفيوز جهد 12kV وتياره المقنن 100 أمبير يمكنه تحمل تيار عالي قدره 224 أمبير لمدة 5 ثواني أو تيار قدره 180 أمبير لمدة 20 ثانية وهكذا دون أن يبدأ في الانصهار .

مثال :

محول 1000 MVA (جهد 11/0.4) ، احسب التيار المقنن للوقاية المركبة في الجانبين.

الحل:

- تيار المحول المقنن جهة الابتدائي = 52 A ، وتيار المحول جهة الثانوى = 1443A
- وطبقا للقواعد السابقة يكون أنسب وقاية في الابتدائي هي فيوز 63 أمبير
- في الجانب الثانوى يكون أنسب وقاية هي CB 1600 أمبير

Table 19-5 Fusing times

U _n	I _n	Dimension "L"		Starting-up periods in seconds					
kV	A	mm	A	5	10	20	30	40	60
7,2	63	292	I _f	210	190	170	160	155	145
			I _{r max} =k·I _f	118	106	95	90	87	81
	80		I _f	300	270	240	230	215	205
			I _{r max}	165	148	132	126	118	113
	100		I _f	400	360	320	300	285	270
			I _{r max}	224	201	179	168	159	151
	63	442	I _f	220	200	180	170	165	160
			I _{r max}	132	120	108	102	99	96
	80		I _f	300	270	240	230	215	205
			I _{r max}	180	162	144	138	129	123
	100		I _f	370	330	300	280	265	250
			I _{r max}	222	198	180	168	159	150
12	63	557	I _f	220	200	180	170	165	160
			I _{r max}	132	120	108	102	99	96
	80		I _f	300	270	240	230	215	205
			I _{r max}	177	159	142	136	127	121
	100		I _f	380	340	305	285	275	260
			I _{r max}	224	200	180	168	162	153

ثانياً خطوات حساب سعة القطع لجهاز الوقاية :

1- احسب التيار المقنن للمحول

$$I_{rated} = \frac{MVA}{\sqrt{3} V}$$

2- احسب تيار القصر I_{CU} وطبقاً للتعريف (هو قيمة أكبر تيار القصر فى الظروف العادية) فإنه يساوى:

$$I_{CU} = \frac{I_{rated}}{Z_{PU}}$$

3- قيمة سعة القصر للقاطع تحسب ليس حسب قيمة I_{CU} بل تحسب حسب قيمة I_{CM} وهو يمثل قيمة تيار القصر الذى يمر بالقاطع إذا تم غلقه على قصر موجود بالشبكة (وهذا ظرف غير عادى وأصعب ولذا تياره أكبر من التيار الأول I_{CU}). والعلاقة بينهما تحسب هكذا

$$I_{CM} = n I_{CU}$$

حيث قيمة n تحسب من الجدول 19-7 ، ثم نختار سعة القاطع بحيث تكون أكبر من I_{CM}

Table 19-6

$I_{cm} = n \times I_{cu}$	
n	قيمة تيار القصر " kA "
1.5	$4.5 \leq I_{cu} \leq 6$
1.7	$6 < I_{cu} \leq 10$
2.0	$10 < I_{cu} \leq 20$
2.1	$20 < I_{cu} \leq 50$
2.2	$50 < I_{cu}$

والجدول 19-8 يعطى قيمة محسوبة لتيار القصر جهة الثانوى لمحولات ذات قدرات متعددة حسب الخطوات السابقة.

Table 19-7

Sn	[kVA]	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	قدرة المحول
Ucc (1)	%	4	4	5	5	5	6,25	6,25	6,25	6,25	نسبة المعاوقة
In (2)	[A]	722	909	1154	1443	1804	2309	2887	3608	4547	تيار المحول
Isc (2)	[kA]	18	22.7	23.1	28.9	36.1	37	46.2	57.7	72.7	تيار القصر

لاحظ في القيم السابقة أنها تمثل الحد الأقصى لتيار القصر بالمحول والواقع أن تيار القصر الفعلى سيكون أقل من هذا حسب نسبة الـ Source Impedance التي أهملناها في الحسابات السابقة على اعتبار أن المحول متصل بشبكة قوية تمثل بـ Infinite bus وليس لها معاوقة أما في حال اتصال المحول بشبكة معزولة أو شبكة ضعيفة فلا شك أن تيار القصر سيكون أقل من ذلك.

وفيما يلي بعض المقننات للمصهرات المستخدمة في حماية بعض المحولات الكهربائية ذات القدرات المختلفة وجهود مختلفة . والأشهر هو استخدام المحولات جهد 11kV والتي تجد القيم المناسبة لها تحت قيمة 15 kV على سبيل المثال فالمحول قدرة 500 kVA يحتاج لفيوز قدرة 40 أمبير ، وهكذا.
ملحوظة : الجداول 19-9 هنا كلها من ABB وقد تختلف القيم قليلا حسب الشركة.

Table 19-8 Fuses for different transformers sizes

Transformer rated power [kVA]	Rated voltage of the transformer [kV]				
	6	10	15	20	30
	Rated voltage for the fuse-link				
	7,2	12	17,5	24	36
	Fuse-link rated current [A]				
20	6,3	6,3	3,15	3,15	—
30	6,3	6,3	6,3	3,15	3,15
50	10	6,3	6,3	6,3	3,15
75	16	10	6,3	6,3	6,3
100	20	16	10	6,3	6,3
125	20 or 25	16	10 or 16	10	6,3
160	25	20	16	10	10
200	40	20	16	16	10
250	56	31,5	20	16	10
315	56	31,5 or 40	25	20	16
400	63	40 or 56	25 or 31,5	20	16
500	80	56	40	25	25
630	100	63	56	31,5	25
800	—	80	63	40	31,5
1000	—	100	63	50	40
1250	—	—	—	63	—

والشكل 19-19 يعطى نموذجاً للوحات المحولات قدرة 1000 ك ف أ فى مصر ويظهر فيه المهمات الأساسية التى تركيب على جانب الجهد المتوسط ، وقيم الفيوزات التى تستخدم فى الجهتين.

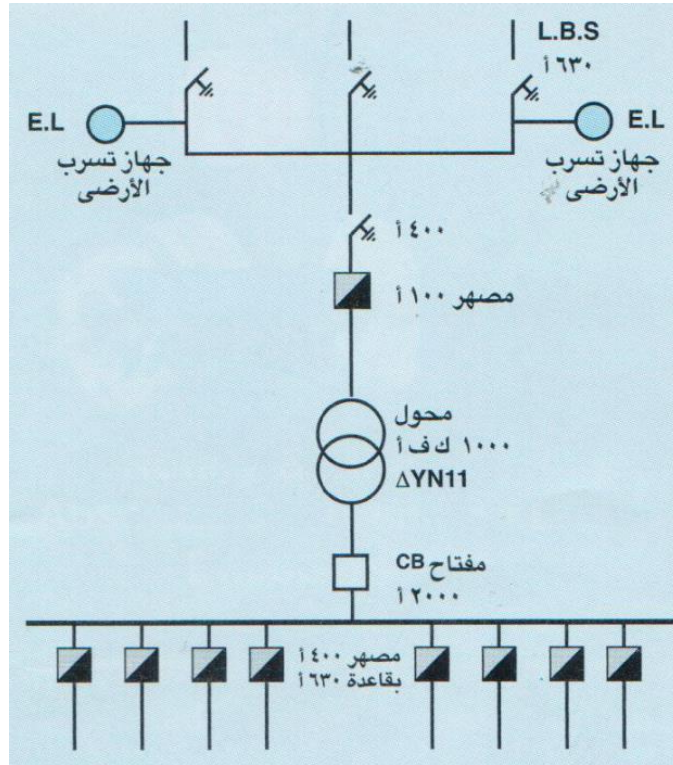


Figure 19-19

19.4.8 حماية محولات التوزيع من الجهود العالية

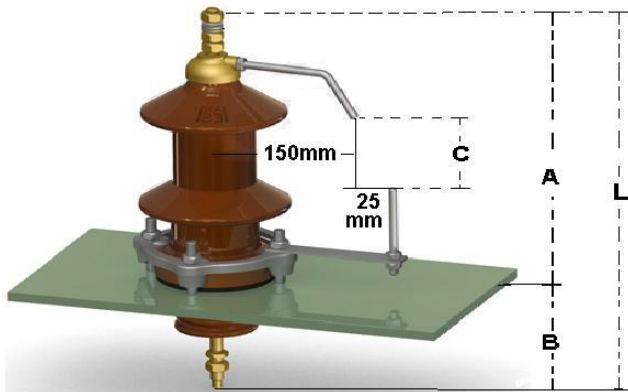


Figure 19-20 Rod Gap

قد يضرب البرق مثلاً أحد الخطوط الهوائية ومن ثم تسير الـ Surge على الخط وتحاول الوصول للمحول أو قد يظهر جهد عالي بالخط نتيجة تشغيل مكثفات أو فتح قواطع ، و هذا يمكن أن يؤدي لظهور جهد عالي على محول التوزيع ، ولذا تزود المحولات بما يسمى Rod Gap كما في الشكل 19-20 ، أو الصورة في الشكل 19-21 فإذا ارتفع الجهد فجأة بسبب البرق أو غيره كان المرور خلال هذه

الـ Gap أسهل من المرور خلال البوشينج Bushing نفسه ومن ثم تكون الـ Gap قد قامت بحماية المحول. ويتم اختيار المسافات في الشكل السابق من الجدول 19-10.

Table 19-9

جهد 36 ك ف	جهد 24 ك ف	جهد 12 ك ف	الابعاد / الجهد
485	385	310	A
132	132	117	B
200	100	70	C
617	517	427	L



Figure 19-21

19.5 العنصر الثالث فى منظومة الجهد المتوسط: وحدة الربط الحلقية

وتسمى Ring Main Unit, RMU ، وهى مكونة من ثلاثة أقسام ، يقوم القسم الأول منها باستلام الجهد 11



Figure 19-22 RMU

kV القادم من لوحات التوزيع (الموزعات) ، والقسم الثانى يقوم بتغذية المحول ، أما القسم الثالث فيتصل بوحدة حلقية أخرى لتغذية محول آخر كما فى الشكل 19-22. ومن هنا أصبحت وسيلة التحكم فى المحول من فصل وتشغيل بجوار المحول مباشرة كما تم تقليل أطوال الكابلات

لكن لا تنس أن مقاطع الكابلات قد تغيرت أيضا وذلك لأن الكابل الواحد صار مسؤولا عن تغذية عدد من محولات التوزيع مربوطة مع بعض من خلال الوحدات الحلقية الأخرى.

19.5.1 صناديق التوزيع في شبكة الجهد المنخفض :

ويطلق عليها المغذيات الثانوية Secondary هي التي تنقل القدرة من محولات التوزيع إلى نقاط الاستهلاك. وشبكة توزيع الجهد المنخفض تتضمن:

- خطوط هوائية (كما في الريف) أو كابلات أرضية (في المدن) .
- أكشاك توزيع
- لوحات توزيع عمومية وفرعية داخل المباني وخارجها.

وهذه اللوحات (شكل 19-23) تفرض ظروف العمل وضعها في العراء في الأجواء المفتوحة لذا فإن هذا النوع



Figure 19-23 صناديق التوزيع

من اللوحات يراعى فيه حماية اللوحة ومعداتنا الداخلية من العوامل البيئية فيتم تصنيع هذه اللوحات بإحكام وتكون مدهونة بدهانات خاصة تقاوم العوامل الجوية بجميع ظروفها وتكون مقاومة لتسرب الأتربة ومقاومة

لتسرب المياه. ويتم تركيب تلك اللوحات على قواعد لا تقل عن 0.4 متر حتى يسهل تركيب الكابلات من أسفل حتى يسهل التعامل مع أجهزة الفصل بها ويتم إدخال الكابلات إلى تلك اللوحات من خلال جالند وذلك لمنع تسرب الحشرات إلى داخل اللوحات.

وفي معظم دول الخليج يكون لكل محول صندوق توزيع واحد يسمى Feeder Pillar بعدد مخارج يتناسب مع

قدرة المحول كما في الشكل 19-24 بسبب ارتفاع أحمال الفيالات والسكن عموما هناك .



Figure 19-24

أما في مصر فيمكن أن يتصل بالمحول من 4-6 أكشاك توزيع (معروفة بكشك سيمنس).

والشكل 19-25 يظهر نموذج لأحد أكشاك التوزيع الخاصة بالجهد المنخفض وكل صف رأسي تظهر فيه الثلاثة فيوزات المخصصة لحماية الـ 3-Phase الخاصة بأحد كابلات الخروج أما كابل التغذية فموجود يسار الصورة.

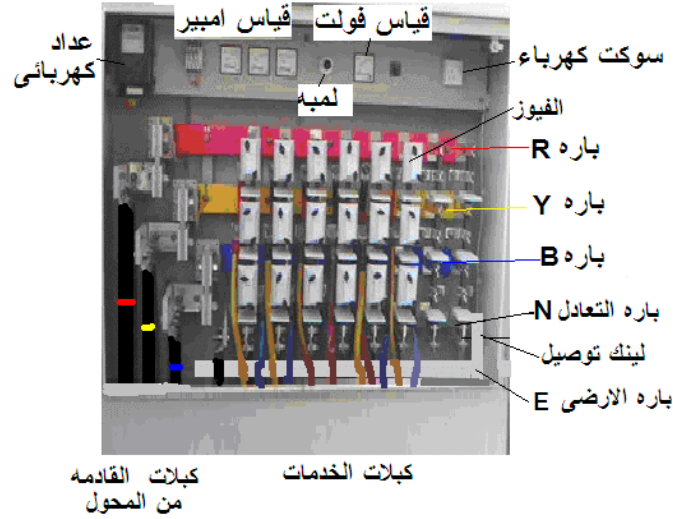


Figure 1919-25 Feeder Pillar

19.5.2 تنسيق صناديق التوزيع

في الشكل 19-26 يمثل المحول بمربع أزرق في المنتصف ، يتصل به أربعة أكشاك توزيع جهد منخفض (مربعات صغيرة) ، لاحظ أن كل صندوق من صناديق المحول الأربعة يتصل بصندوق تابع لمحول آخر من خلال خط منقط (وهذا يعني أن هذا الكابل الإضافي يكون مفتوحا في الظروف الطبيعية Normally Open). ويمكن من الشكل أن تكتشف أن بهذه الطريقة يتم تأمين خروج أى محول بنسبة مئة في المئة ، بمعنى لو خرج أى محول بسبب عطل مثلا فإن صناديقه الأربعة ستوزع على أربعة محولات مختلفة ، ويصبح كل محول محملا بصندوق واحد إضافي فقط.

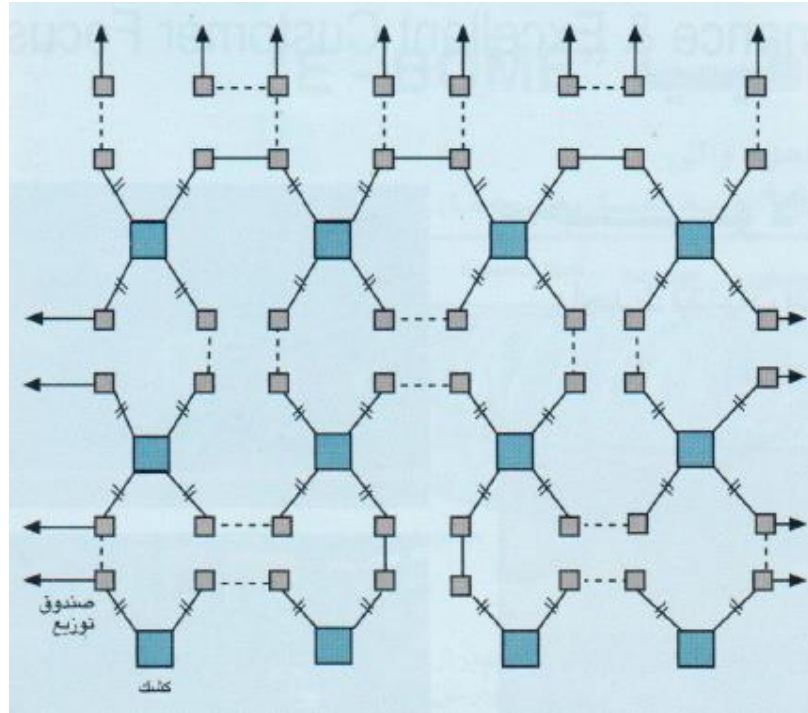


Figure 19-26 تأمين الأحمال بنسبة 100%

أما في الشكل 19-27 فالأحمال يتم تأمينها بنسبة 50% فقط.

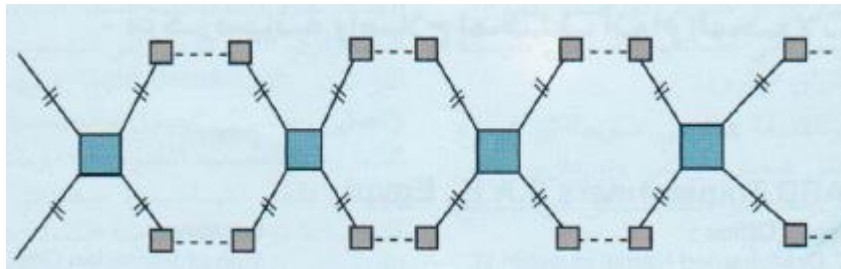


Figure 19-27

وبالطبع فالفيصل في الاختيار سيكون لأهمية الأحمال والميزانية المتاحة.

20

أنظمة التغذية في الجهد المتوسط

وظيفة المغذيات أن تصل بين محطة التوزيع الفرعية (الموزع) وبين محولات التوزيع المنتشرة في أجزاء المدينة المختلفة ، بمعنى آخر أنها تمثل شبكة التوزيع داخل مدينة أو قرية أو مجموعة قرى. و منظومة التوزيع هذه تقع بالكامل في منطقة الجهد المتوسط .

20.1 أشكال منظومة التغذية

وتتقسم أشكال التوزيع فيها إلى عدة أنواع منها:

20.1.1 نظام الشبكات الإشعاعية

يعتبر (Radial Distribution System) أبسط نظام توزيع وأكثره انتشارا في منظومات التوزيع بالقرى والأرياف ، وفيه تكون التغذية دائما من جهة واحدة فقط بينما الأحمال في الجهة الأخرى.

ويتكون هذا النظام من مجموعة من الدوائر المستقلة التي تخرج من محطة المحولات مباشرة ليغذي كل منها منطقة محددة ، وكل دائرة تتكون من المغذي الرئيسي Primary Feeder وعليه قاطع CB مناسب ، ثم تتفرع منه فرعايات أخرى وهي التي تتصل بمحولات التوزيع شكل 20-1، التي تخرج منها فرعايات الجهد المنخفض Secondary Feeders .

وتتصل هذه الفرعايات بالمغذي الرئيسي عن طريق مصهرات (Fuses) حتى لا يتسبب حدوث أي خطأ في الفرعايات إلى فصل المغذي الرئيسي بالكامل ، وإن كان الواقع يقول أن هذا الاحتمال وارد جدا ، فقد لا يشعر الفيوز بالعطل ومن ثم تقع مسؤولية فصل هذا العطل على القاطع الرئيسي في المحطة ومن ثم تخرج جميع المحولات الفرعية المركبة على هذا المغذي.

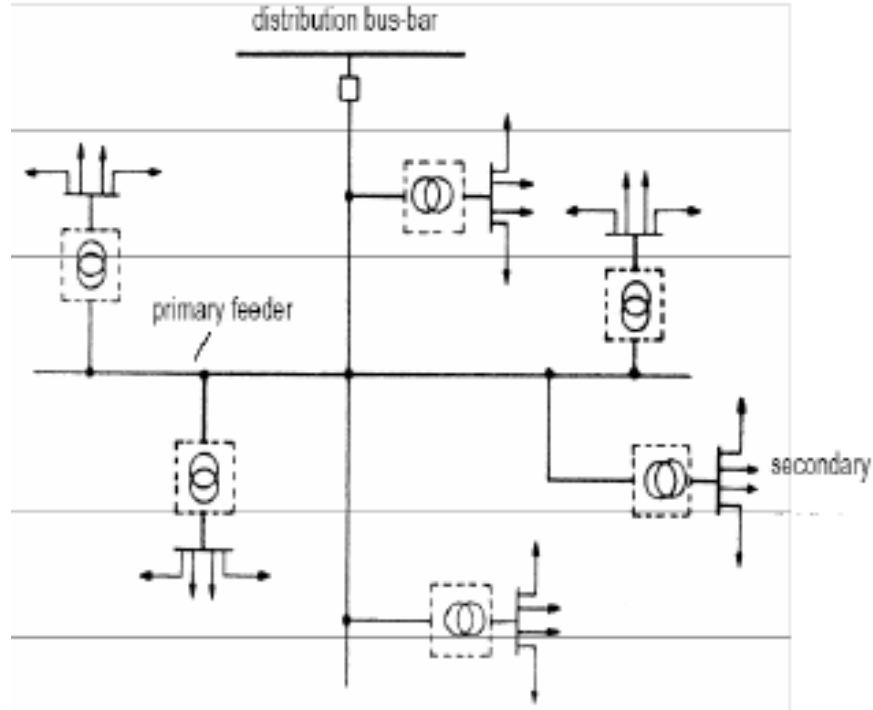


Figure 20-1 Radial system

20.1.2 نظام الـ Loop المفتوحة

في هذا النظام يكون للمغذي الرئيسي مسار مغلق يبدأ من محطة التوزيع (الموزع) وينتهي فيها أيضا ، أي أن نهايتي الموزع تكونان داخل المحطة (شكل 20-2) ، ومن ثم فالمغذيات تتمتع بميزة التغذية من جهتين على عكس نظام الـ Radial الذي يتمتع بتغذية من جهة واحدة فقط.

لاحظ أن الموزع نفسه يتم تغذيته من جهتين (خلايا رقم 9 و10 و5 و6) كما في الشكل ، وهذا أيضا لزيادة الاعتمادية. كما أن الـ BB المستخدم في الشكل من النوع Sectionalized Single BB وهو الأكثر انتشارا (الخلتين 7 و8 تعتبران خلايا ربط).

لاحظ هنا أن الـ Loop مفتوحة وذلك في الظروف العادية للتشغيل من أجل تقليل قيمة تيار القصر ، لأنه إذا كان الحلقة مغلقة وحدث عطل فإن تيار القصر سيغذى من جهتين (ومن مصدرين) وهذا يعني أن قيمة تيار الـ Short Circuit سيكون مرتفعا ، أما إذا كانت الـ Loop مفتوحة فقد جمعنا بين الحسنيين : أن تيار القصر منخفض وفي نفس الوقت هناك مصدر تغذية احتياطي يمكن استخدامه وقت اللزوم فقط وذلك بغلق مفتاح الفصل الموجود في الحلقة.

ويتكون هذا النظام من فيوزات أيضا على المحولات المتفرعة من الـ Loop (وقد يستخدم CB أيضا) بالإضافة إلى القاطع الرئيسي الموجود في بداية الحلقة داخل محطة التوزيع (الموزع) والذي يفتح آليا في

حالة فشل الفيوزات في فصل العطل على الفرع . ويتم تغذية الأحمال بعد ذلك بواسطة الجزء الآخر من المغذي ، لذلك تصميم هذا المغذي يجب أن يتحمل أحمال الجزئين معا.

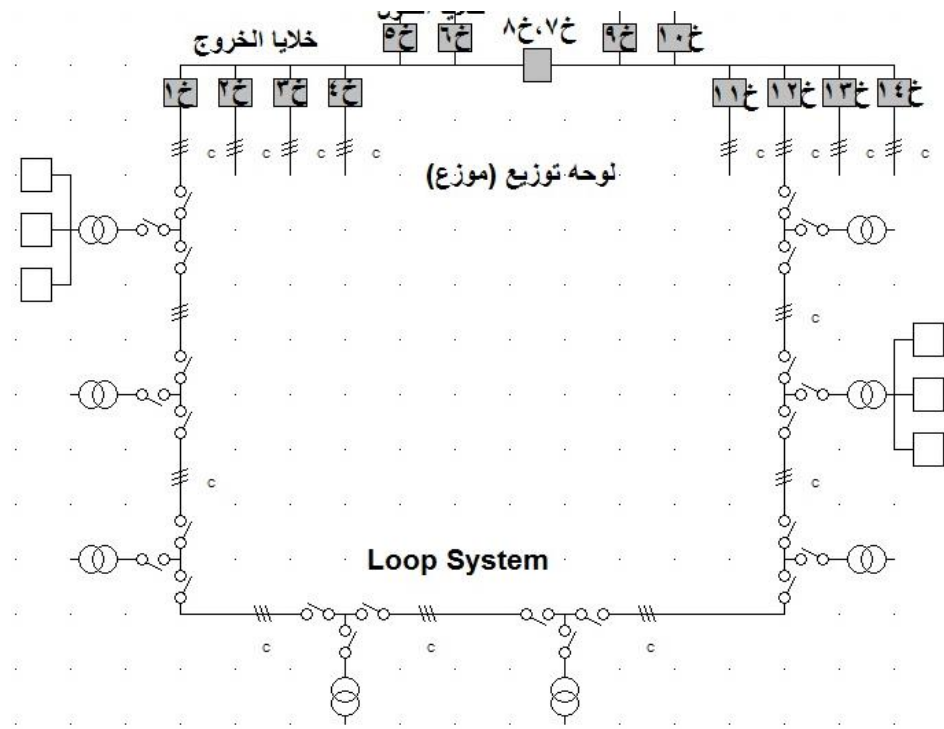


Figure 20-2 Open Ring System

واضح أن العيب الأساسي لنظام Radial السابق قد تلاشي هنا ، وذلك بضمان استمرارية الخدمة للمستهلكين ولكن على حساب التكلفة العالية . وهذا النظام شائع الاستخدام في المدن الرئيسية فقط. في الشكل 20-2 السابق لاحظ أن الخليتين خ1 ، خ12 تقومان بتغذية الـ Open Loop مع وجود سكينة مفتوحة في أحد الأكشاك وذلك لزيادة الاعتمادية في الشبكة ، فعند حدوث خلل في أحد الكابلات يتم التغذية من المصدر الآخر.

والمحولات الفرعية في هذا النظام تكون أكبر حجما من المنظومة السابقة (Radial) فلن تجد في هذا النظام محولات بقدرة عشرات الـ kVA كما في السابق . ويرتبط كل محول بالـ Loop من خلال ما يعرف بـ .RMU

وقد تأتي تغذية الموزع جهة اليمين (خ9 و خ10) من محطة توزيع بينما تأتي التغذية جهة اليسار (خ5 ، خ6) من محطة واحدة ، وقد تكونان من مغذيات من نفس المحطة.

20.1.3 نظام الـ Loop المغلقة

في هذا النظام تكون الحلقة مغلقة حتى في الظروف العادية ، وهذا يؤدي لزيادة الاعتمادية فالمغذيات

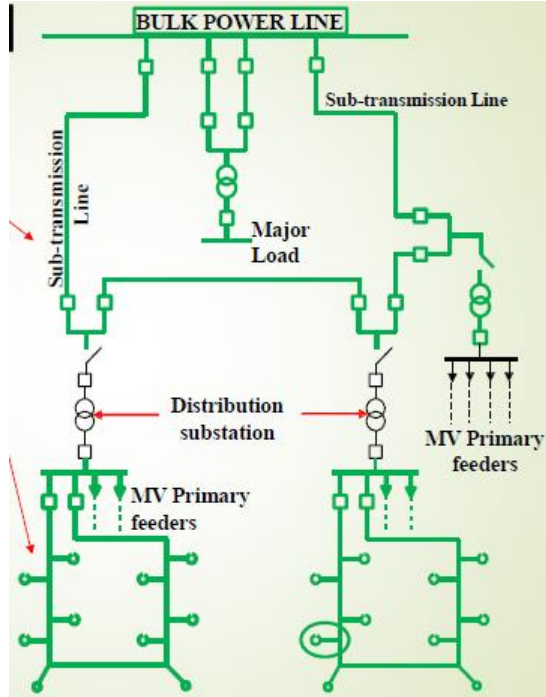


Figure 20-3 Closed Loop system

تكون هنا دائمة قائمة من محطتين مختلفتين ، وبالطبع فاحتمالية أن تخرج كلتا المحطتين هو احتمال ضعيف وبالتالي فالاعتمادية أعلى.

لاحظ في الشكل 20-3 أن المحولات الموجودة في الـ Loop السفلى مثلا مغذاة من خليتين في الموزع (Distribution S/S) وهذا الموزع نفسه مغذى من خليتين مختلفتين في الـ Sub Transmission العلوية ، وهذا يعطى مثالا على حجم التأمين لهذه الشبكات التي تجدها غالبا في المناطق الهامة.

ويتميز أيضا بأنه الأقل في المفقودات ففي حالة التغذية الـ Radial يكون التيار في الـ

Sections الأولى من الخط مرتفعاً جداً وهذا يتسبب في ارتفاع قيمة $I^2 R$. بينما لو كانت التغذية من جهتين فسيوزع التيار بين الجهتين ولا يتراكم في الأجزاء الأولى ومن ثم تقل المفقودات .

ويترتب على تحسين المفقودات أن يتحسن أيضاً توزيع الجهد فلا تجد انخفاضاً شديداً في نهاية الخط كما في حالة الـ Radial system

لكن بالطبع كل هذا على حساب التكلفة العالية ولذا لا تجد هذا النظام في مصر إلا نادراً ، لكنه شائع في دول الخليج . وأهم شيء في هذا النظام أنه يحتاج إلى Synchronization .

لكن نظام الـ Closed Loop هو الأساسي في منظومات الجهد الأعلى بدءاً من 33kV فما فوق حيث يتم ربط محطات هذه الجهود دائماً بنظام الحلقة المغلقة.

20.1.4 تغذية كبار المشتركين

يوجد عند كبار المشتركين لوحة توزيع أوتوماتيكية على الجهد المتوسط أو الجهد المنخفض أو الاثنين معاً والتي تعمل بنظام (2 out of 3) كما في الشكل 20-4 :

ففي الوضع الطبيعي يكون مفتاحين فقط في وضع توصيل والمفتاح الثالث في وضع فصل (غالباً المفتاح 3) حتى لا يتم تداخل المصادر مع بعضها . فإذا خرج المغذى رقم 2 مثلاً فيغلق المفتاح رقم 3 أوتوماتيكياً . وتحتوي هذه اللوحات على دوائر انترلوك كهربى وميكانيكى لمنع تداخل المصادر .

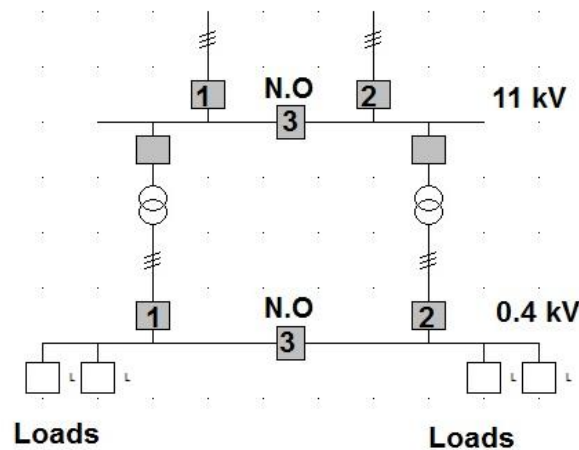


Figure 20-4 two out of three

20.1.5 أنظمة من الواقع

عملياً ستجد أنظمة مختلطة بين كل ماسبق فيمكن أن تجد في دوائر الموزع الواحد دائرة Radial وأخرى Open Loop ، وربما خليط من أكثر من ذلك . والشكل 20-5 يمثل SLD للوحة موزع منطقة الجامعة في بنى سويف حيث يستخدم أكثر من نظام كما هو واضح في الشكل .

لاحظ وجود السكاكين المفتوحة التي تصل بين المغذيات الرئيسية والتي تكون كما ذكرنا في الوضع المفتوح ولا تغلق إلا عند الحاجة للتغذية من الجهة الأخرى نتيجة فصل المغذى الرئيسي.

لاحظ في الشكل السابق أن المحطة تستقبل مغذيان جهد 11 كيلو وموزعين على two Sections وهناك ارتباط (سكاكين مفتوحة) بين المغذيات الفرعية التي تخرج من هذين الجزئين بحيث يمكن تحويل التغذية من قسم لآخر حسب ظروف التحميل والصيانة والأعطال وخلافه.

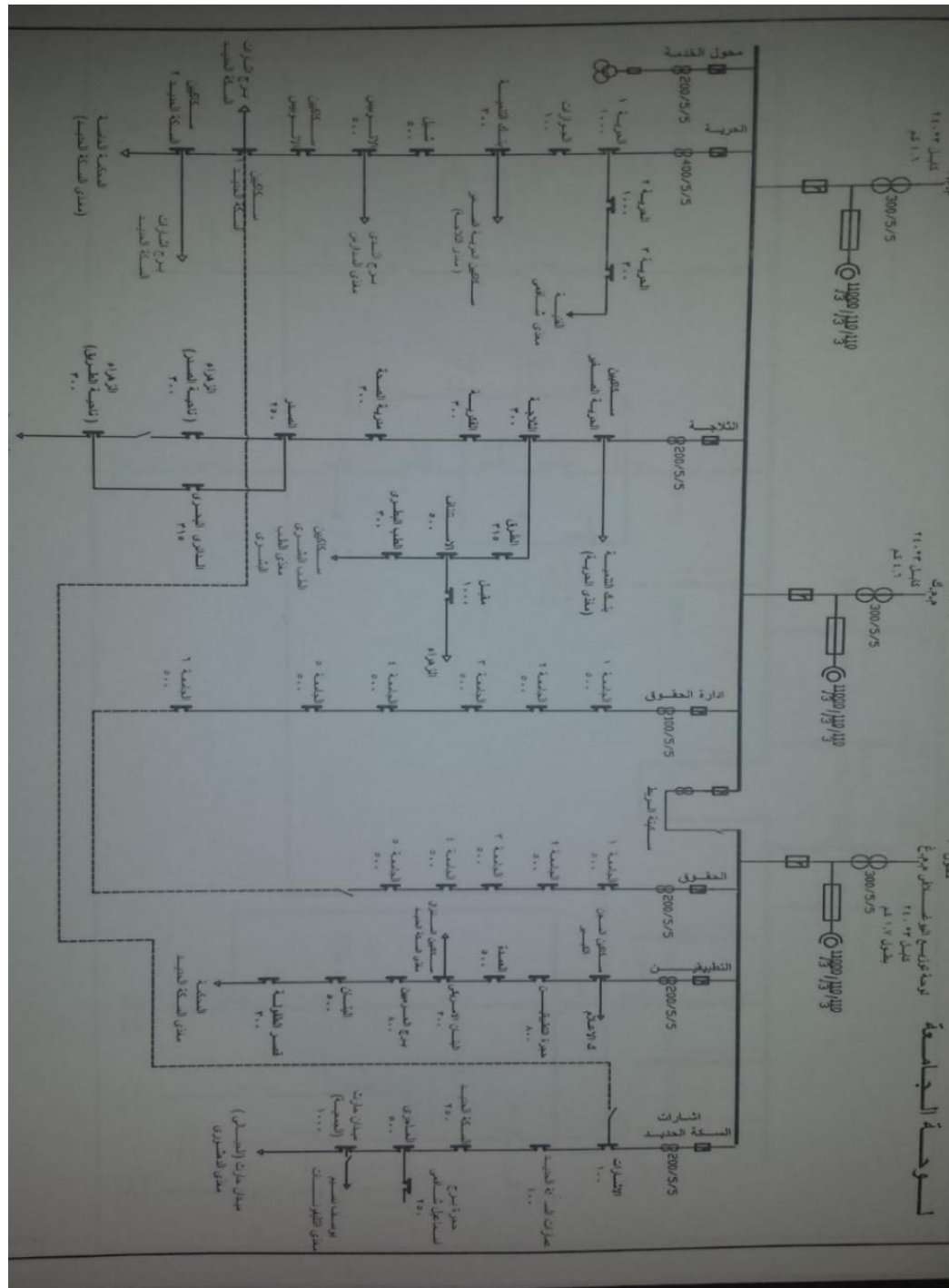
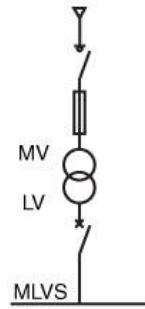


Figure 20-5

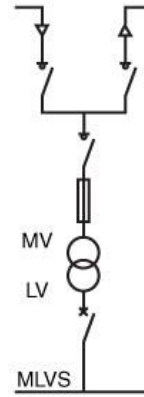
وفيما يلي نماذج لأشكال أخرى لطريقة ربط محولات التوزيع الموجودة عند المستهلك بشبكات التوزيع - غير التي سبق عرضها - وكل واحد منها يمكن استنباط ميزاته وعيوبه من جهة الاعتمادية والتكلفة

IEEE Recommended Practice for Electric Power (الأشكال منقولة من كتاب
(Distribution

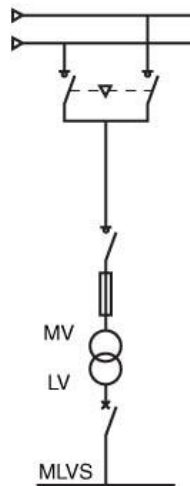
a) Single-line:



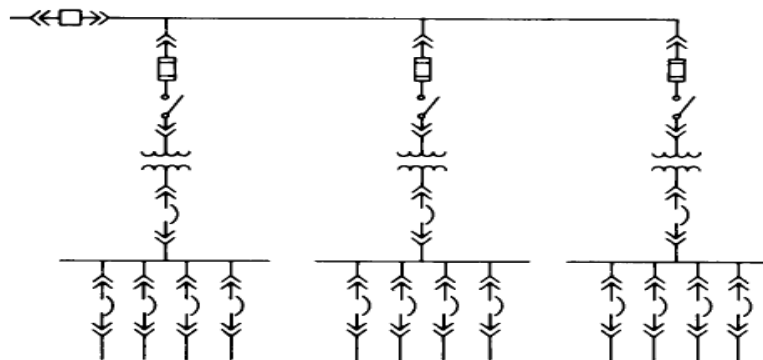
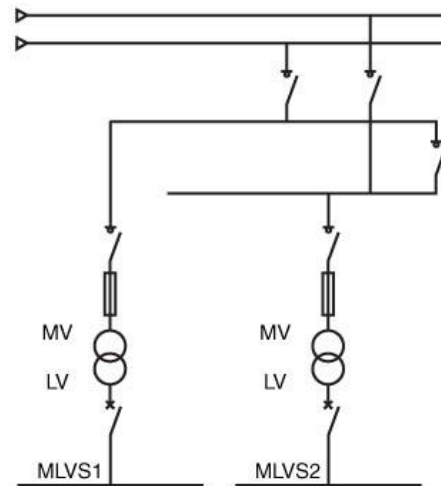
b) Ring-main:

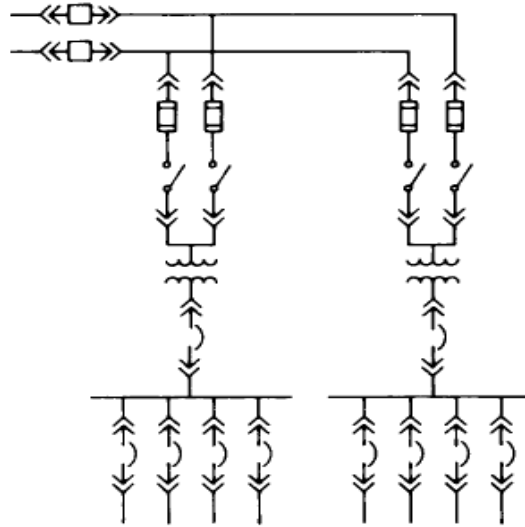
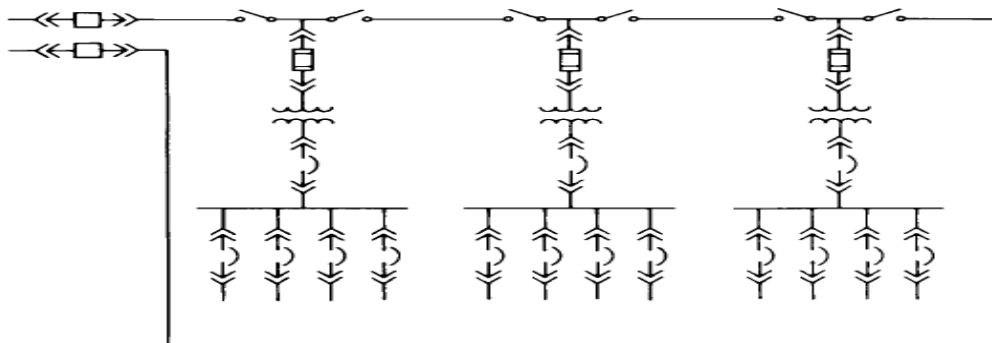
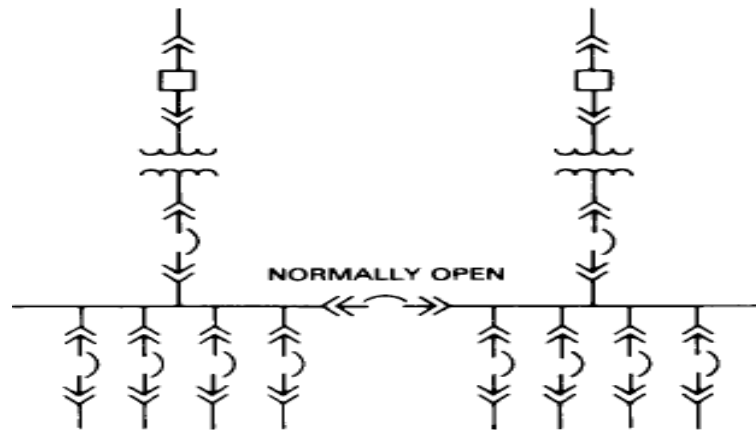


c) Duplicate supply:

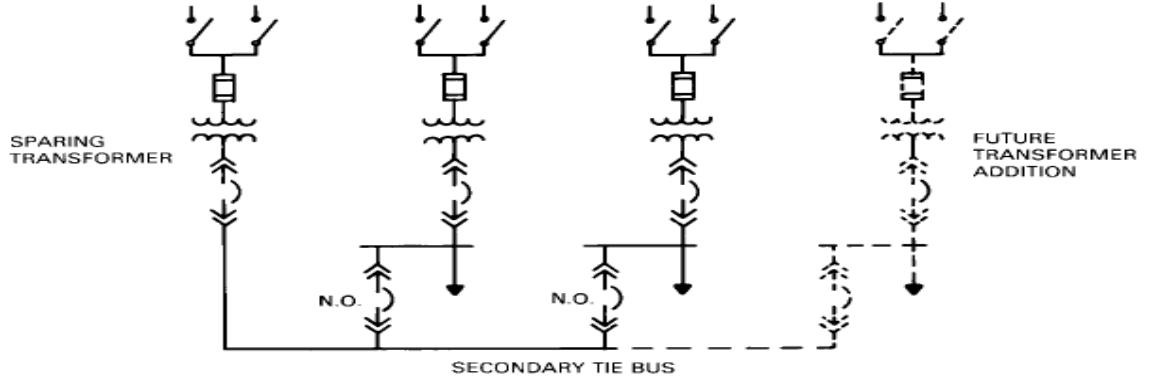


d) Double busbar with duplicate supply:

*Expanded radial system*

*Primary selective system**Primary loop system*

Secondary selective system



Sparing transformer scheme

20.2 تأثير دخول التوليد الموزع DG ضمن منظومة التوزيع

منظومة القوى الكهربائية التقليدية كانت دائما تمثل بمرحلة توليد يتبعها مرحلة نقل الطاقة ثم التوزيع وانتهاء بالأحمال كما في الشكل 20-6. لكن

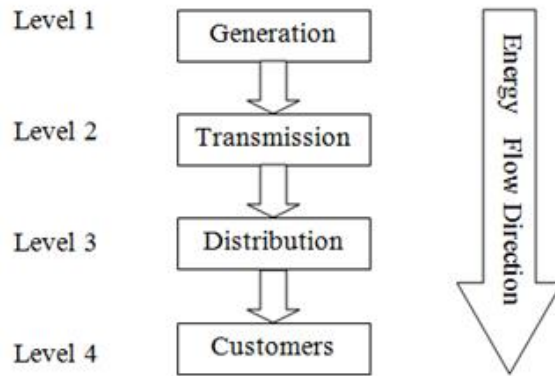


Figure 20-6 Traditional Power Distribution

مع ظهور نظم توليد الطاقة من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة مثل الخلايا الشمسية أو الرياح تغير شكل المنظومة ، فأصبحت المنظومة الجديدة مختلفة في اتجاه مرور القدرة عن نظم التوزيع التقليدية كما في الشكل 20-7 حيث نلاحظ أن التوليد صار موجودا في بداية المنظومة (المحطات التقليدية الضخمة) ، وموجودا في نهاية المنظومة أيضا بجوار الأحمال (محطات الطاقة الجديدة) .

وساعد على ذلك أن محطات الطاقة الجديدة (ذات القدرات المحدودة غالباً) يمكن تنفيذها بجوار الأحمال مباشرة بل إن بعض هذه المحطات يمكن إنشاؤها فوق أسطح بعض المباني ، على عكس المحطات التقليدية (ذات القدرات الضخمة) والتي كان من المستحيل أن تنشأ بجوار الحمل.

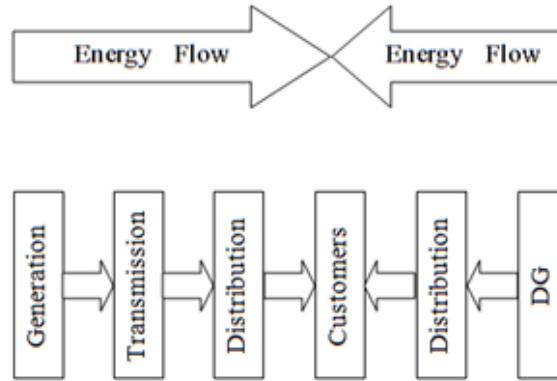


Figure 20-7

20.2.1 مميزات وعيوب التوليد الموزع

هذه الصورة الجديدة لمنظومة القوى جعلت التوليد ليس فقط في بداية المنظومة بل أصبح التوليد موزعاً في أكثر من مكان بالشبكة كما في الشكل 20-8 ، ومن هنا ظهر مصطلح التوليد الموزع Distributed Generation, DG. كما ظهرت نوعية مختلفة من المشاكل التي تواجهها منظومة القوى لم تكن موجودة بالسابق. وأصبحت هذه المشاكل تمثل مساحة كبيرة من الأبحاث الجديدة في مجال نظم التوزيع.

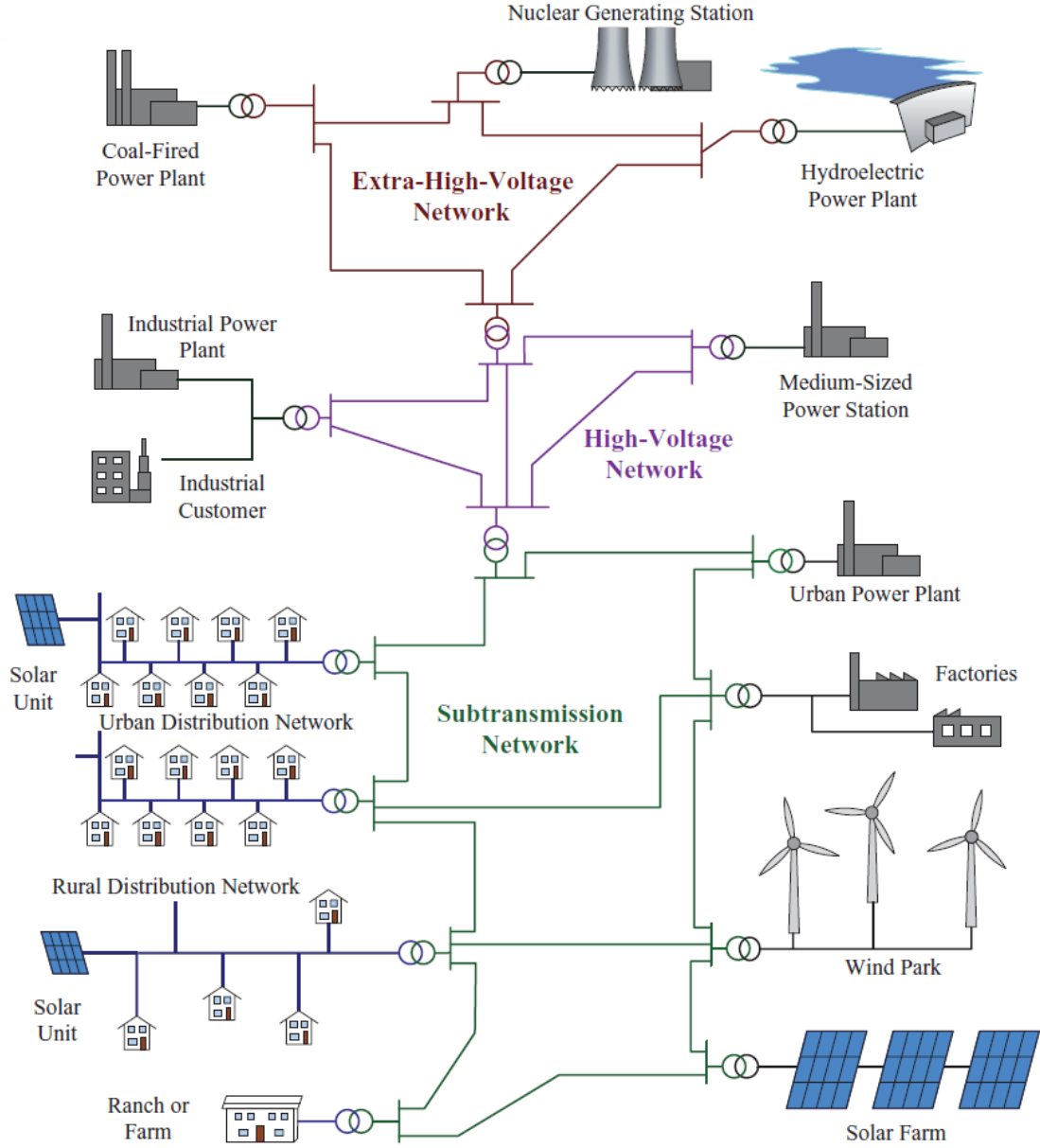


Figure 20-8 التوليد الموزع

وفيما يلي نعرض عددا من المشاكل المرتبطة بنظم التوليد الموزع:

20.2.2 مشكلة التنسيق - Coordination

على سبيل المثال فقد ظهر مع التوليد الموزع DG مشكلة تعقد تنسيق أجهزة الوقاية ، ففي نظم التوزيع التقليدية كان من الممكن ضبط تنسيق أجهزة الوقاية طبقا لترتيب محدد وثابت ، أما في وجود الـ DG فلم يعد هناك شيء ثابت ، فلا مكان للتوليد ولا حتى قيمة التوليد يمكن أن يكون ثابتا ، ومن ثم ظهرت مشكلة تغير قيمة تيار العطل حتى لو كان العطل في نفس المكان بسبب التغذية الإضافية القادمة من مصادر التوليد الموزع المتغيرة القيمة كما في الشكل 20-9.

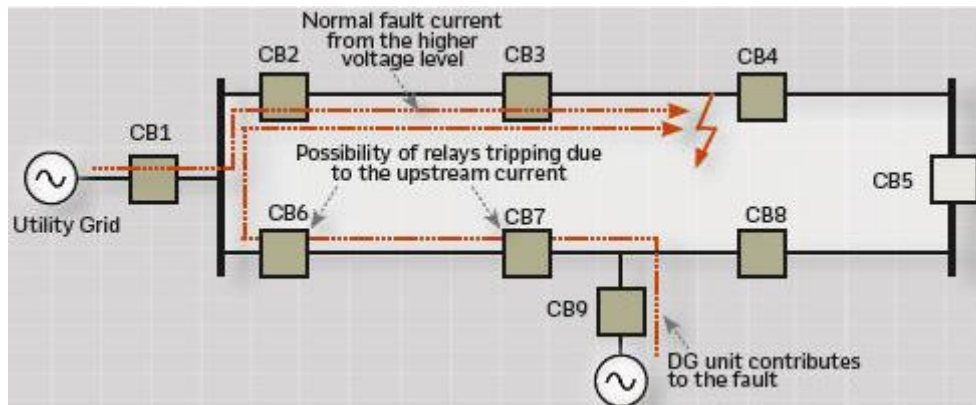


Figure 20-9

ففي النظم التقليدية يمكنك تقدير حجم التنسيق بين أجهزة الوقاية بناء على قيم تيار العطل كما سبق شرحه في الفصل السابق ، لكن المشكلة الآن أن تيار العطل صار متغيرا بسبب الـ DG.

20.2.3 مشكلة الخطأ في تقدير مسافة العطل

كما قد تتغير قيمة المسافة المحسوبة بواسطة جهاز الوقاية المسافية حسب وجود أو عدم وجود الـ DG بل حسب نسبة مشاركة هذا الـ DG بسبب تغير قيمة التيار المار بجزء من الخط (ما بين الـ DG وبين العطل في الشكل 20-10) أثناء العطل عن قيمة التيار المار بجهاز الوقاية ، ومن ثم فستتغير مسافة العطل المحسوبة رغم أن العطل قد يكون في نفس المكان .

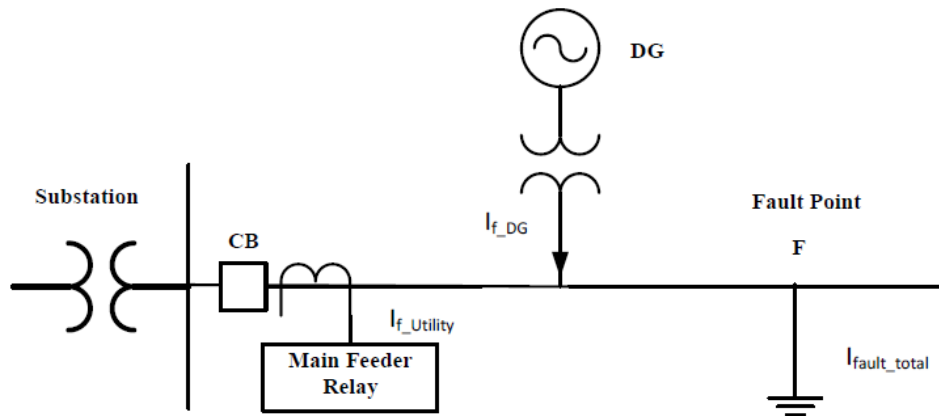


Figure 20-10

20.2.4 مشكلة ارتفاع مستوى القصر

لاحظ من الشكل السابق أن قيمة تيار في بعض أجزاء الشبكة سترتفع على حسب قوة الـ DG المضافة ، وقبل إضافته كان تيار العطل يغذى من مصدر معين ، لكننا بعد إضافة الـ DG صار لدينا مصدر جديد مما رفع من قيمة تيار العطل ، وهذا قد يتسبب في تجاوز قيمة الـ Short circuit Capacity لبعض المعدات ، مما يعنى أنها يمكن أن تحترق نتيجة تيار العطل الجديد.

20.2.5 مشكلة الانعزال Islanding

ومن المشاكل الأخرى التى جدت على السطح ولم تكن من قبل مؤثرة مشكلة الـ Islanding ويقصد بها حدوث خروج لمنظومة التغذية الأساسية (شبكة الدولة بعد فتح الـ Breaker A فى الشكل 20-11) بينما تبقى أجهزة التوليد المتوزع DG وكأنها جزيرة معزولة ومسئولة بمفردها عن تغذية الأحمال كما فى الشكل.

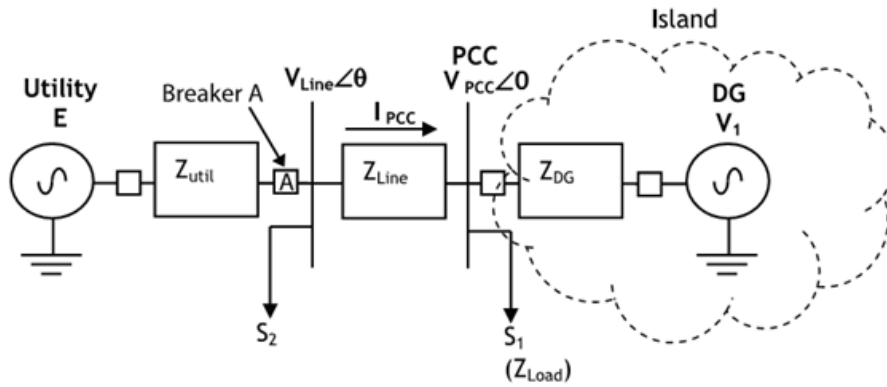


Figure 20-11 Islanding Problem

وهذا الظرف يجب سرعة اكتشافه وفصل أجهزة الـ DG لعدة أسباب منها:

- 1- قدرة الـ DG أقل من أن تغذى الحمل بعد فصل الشبكة الرئيسية وبالتالي فهناك مشكلة تتعلق بها على أساس أنها Weak Source
- 2- بعد فتح الـ Breaker A سيظن فريق الصيانة على الخط أن الخط فى أمان طالما أنه لا يوجد تغذية من المصدر ، وقد يغيب عنه أن هناك مصدر آخر وهو الـ DG فى الجهة الأخرى. لاحظ أن هذه المصادر قد تكون موجودة فى ملكيات خاصة وقد يكون مجرد مصدر كبير داخل أحد المصانع ولديه فائض فهو يبيعه للشبكة. المشكلة أن هذا المصدر الثانى غير محدد القيمة ولا المكان ، وقد يجده مفتوحا ثم فجأة يدخل للخدمة وبالتالي لا علم لهم بها ولا يوجد إمكانية لفصل الخط من الجهتين كما فى الأنظمة التقليدية . ولذا كان لابد من اكتشاف حالة الـ Islanding وسرعة فصل الـ DG .

3- فى حالة عدم فصل الـ DG وعدم اكتشاف الـ Islanding ، فإن هناك احتمال عند رجوع الخدمة من الشبكة العامة أن تحدث مشكلة كبيرة وهى عدم التزامن بينهما Synchronization. بالطبع مالم يكن لدينا أجهزة تزامن فى شبكة التوزيع وهذا غير معتاد.

وهناك مشاكل أخرى عديدة ناتجة عن إضافة الـ DG لشبكة التوزيع . و يمكن الرجوع للأبحاث المنشورة فى هذا المجال.

21

شبكات الجهد المتوسط الهوائية

هى إحدى أنواع شبكات التوزيع الثانوية ، وهى آخر مرحلة فى الجهد المتوسط حيث تنتهى هذه الشبكة بمحولات التوزيع ، وبعدها تبدأ شبكة الجهد المنخفض. تنتشر الشبكات الهوائية فى مناطق الأرياف بمصر والمناطق الصحراوية ، حيث تتميز بالبساطة وقلة التكاليف ، وسهولة اكتشاف الأعطال وسهولة إصلاحها. والمشكلة الأساسية لها أنها تشوه المنظر ، كما أن نسبة أعطالها أكثر من الشبكات الأرضية .

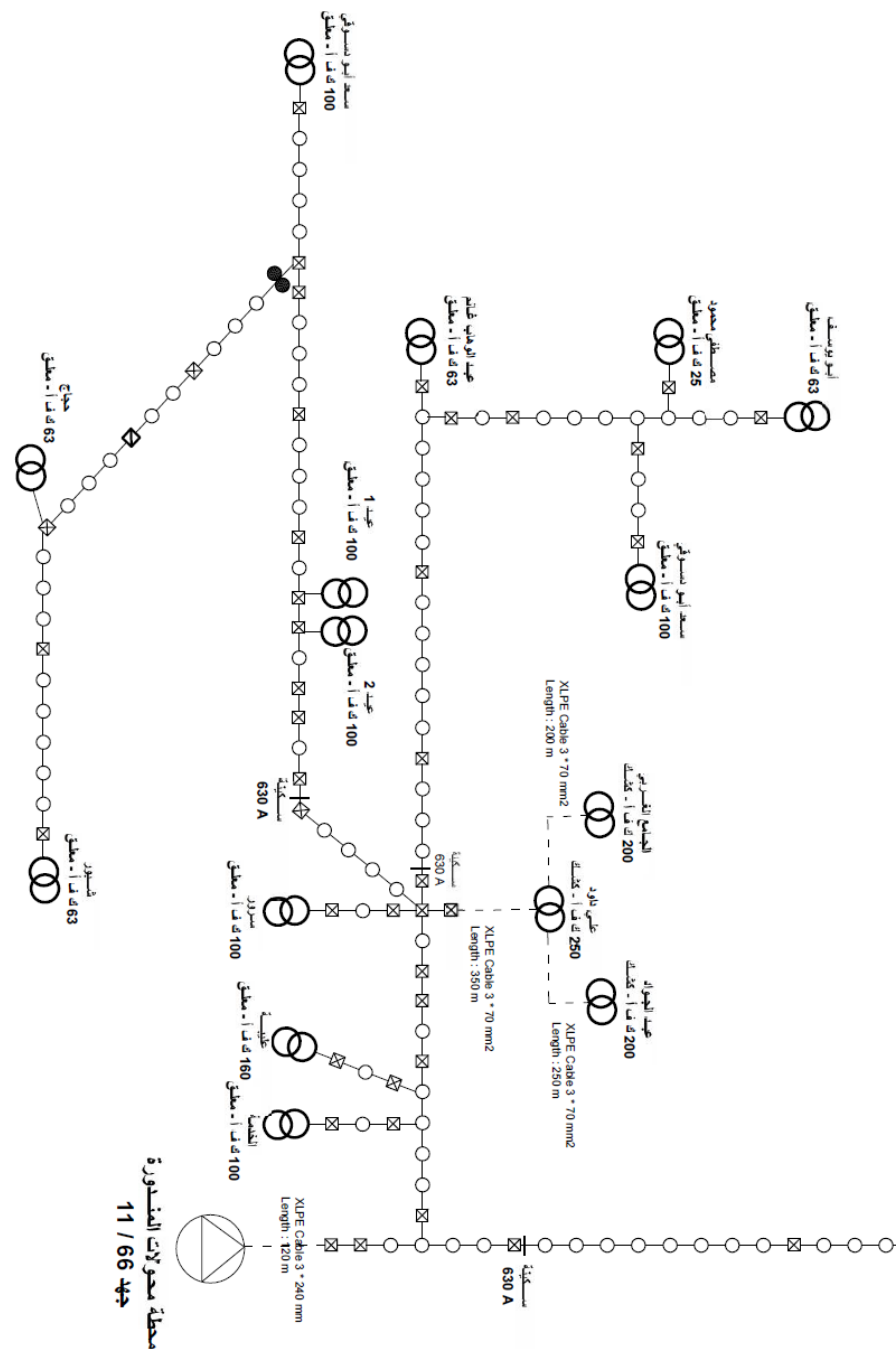
والغريب أنها الأكثر انتشارا فى الولايات المتحدة الأمريكية وكندا ، والسبب فى ذلك أنهم يعتمدون مبدأ هاما وهو أنه طالما أن الشبكة الهوائية لا تسبب مشاكل وأعطالها فى الحجم الطبيعى فلماذا نستبدلها بشبكة أرضية أكثر تكلفة؟.

21.1 أشكال التغذية فى شبكات التوزيع الهوائية

يوجد من الشبكات الهوائية نفس النوعين السابقين : Radial and Ring (Loop) .

21.1.1 أولا الشبكات الإشعاعية Radial

فى الشكل 21-1 نموذج لشبكة توزيع من النوع Radial فى إحدى قرى ريف مصر ، حيث تبدأ الشبكة من محطة محولات 66/11 ك ف (أقصى جنوب غرب الشكل) ويخرج منها مغذى رئيسي



يبدأ بكابل أرضى طوله 120 متر (مرسوم بخط متقطع) لزوم الخروج من المحطة الرئيسية فقط) ثم يتصل هذا الكابل مباشرة بالمغذى الرئيسي الهوائى Main Feeder الذى تتفرع منه بعد ذلك مغذيات فرعية كثيرة من نقاط مستقلة تسمى Tap-off لتغذى فى نهاية كل تغذية أحد المحولات التى تعلق على الأبراج الهوائية ، والتي تتراوح قدرتها ما بين 50 إلى 250 كيلو فولت أمبير كما هو واضح من الشكل.

وغالبا تكون الشبكة خليطا من أجزاء هوائية وكابلات أرضية ومحولات معلقة على أعمدة وأخرى مثبتة على الأرض وممتصة بوحدة الـ RMU.

21.1.2 ثانياً التوصيل الحلقى Ring

نتيجة بعض المشاكل التي تنشأ مع التوصيل الـ Radial مثل انقطاع التغذية عند حدوث عطل في المغذى الرئيسى، ولحل تلك المشاكل وتقليل فترة انقطاع التغذية الكهربائية يتم استخدام نظام التوصيل الحلقى Ring حيث تتم التغذية من الطرفين ويكون بينهما نقطة مفتوحة كما سبق أن بينا فى الفصل السابق حيث يعمل هذا النظام على إعادة الكهرباء للمستهلك بعد اكتشاف مكان العطل وعزله.

الشكل 21-2 يوضح شبكة هوائية يتم الربط فيها من خلال وحدة حلقة RMU ، فعند حدوث عطل ما سيتم فصل ذلك المغذى بالكامل عند لوحة التوزيع رقم 1 ، ثم من خلال قسم التشغيل يتم عمل مسح للخط الهوائي بالعين المجردة ، فإذا تم اكتشاف أن أحد العوازل مكسور مثلاً فعندئذ يقوم قسم التشغيل بإعادة التغذية إلى الأجزاء الأخرى بعد فصل المنطقة التي بها عطل حسب الخطوات الآتية:

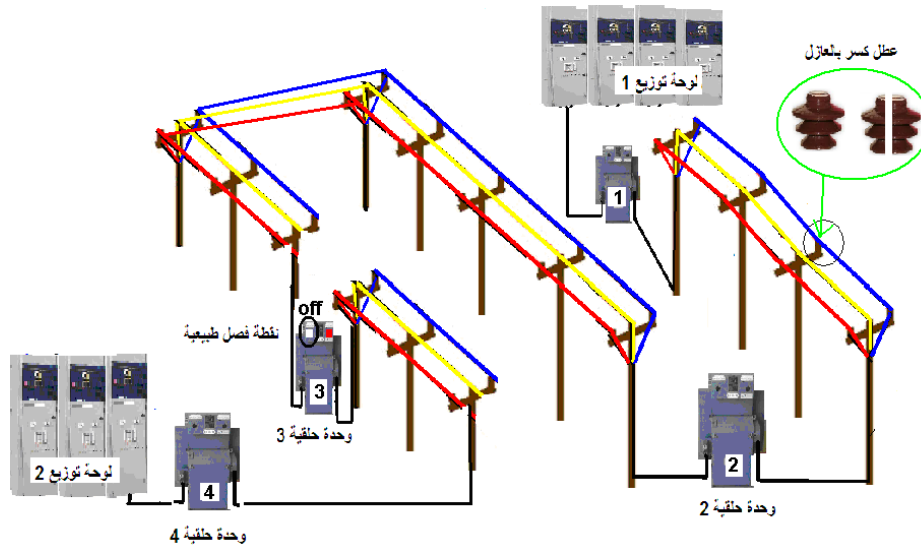


Figure 21-2 RMU in OHD

- 1- يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 1 ثم عمل تأريض
- 2- يتم فصل جانب الخروج للوحدة الحلقية رقم 2 ثم عمل تأريض ، وبذلك يكون قد تم عزل المنطقة التي بها عطل.
- 3- يتم إعادة التغذية من خلال النقطة المفتوحة الطبيعية الموجودة في الوحدة الحلقية رقم 3 .

21.2 العناصر الأساسية فى شبكات التوزيع الهوائية

تتكون الشبكة الهوائية عموما من عناصر أساسية هى :

- 1- الأبراج
- 2- الموصلات (الأسلاك الهوائية)
- 3- العوازل
- 4- مانعات الصواعق
- 5- سكاكين الفصل والفيوزات
- 6- المحولات
- 7- مبيانات الأعطال

وفيما يلى بعض تفاصيل هذه المهمات:

21.3 أبراج شبكة الجهد المتوسط

توجد أنواع متعددة من الأعمدة تستخدم فى شبكات التوزيع منها :

- الأعمدة الخشبية
- الأعمدة الخرسانية
- الأعمدة المعدنية
- الأعمدة الهيكلية

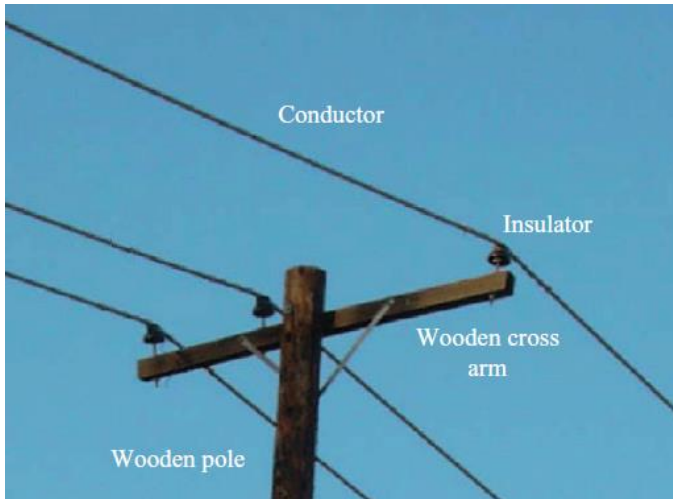


Figure 21-3 برج تعليق فى شبكة التوزيع

- 1- الأعمدة الخشبية (شكل 21-3)
كانت شائعة قديما ولا زالت منتشرة فى البلاد التى تتوفر فيها الأخشاب لاسيما أن هذا النوع من الأعمدة يتميز بالمرونة فى وقت الرياح ، وهى الأكثر انتشارا فى كندا وأمريكا ، ويتم معالجتها بمواد كيميائية للتغلب على مشكلة العفونة والتأثر بالرطوبة.

- 2- الأعمدة الخرسانية : هى أعمدة

قطرها السفلي أكبر من قطرها العلوي بتدرج انسيابي وتتحمل قوة شد 1000/750/500/350 كجم طبقا لطرزتها المختلفة وتستخدم للجهود حتى 11kV ومستخدمة فى مصر بشكل محدود وإن كانت شائعة فى

دول الخليج لكون مقاومتها الكهربائية أعلى من أعمدة الصلب ومن ثم فهي أكثر أماناً. ورغم أنها مكلفة لكنها لا تحتاج لصيانة تقريبا وعمرها طويل مقارنة بغيرها

3- أعمدة مواسير الصلب : تستخدم أعمدة المواسير الصلب في شبكات الجهد المتوسط وهي عبارة عن مواسير من الصلب يتم تنكيها (طلاء بالنيكل) لزيادة عمرها الافتراضي ، ويقسم طولها إلى ثلاث مواسير متداخلة في بعضها بحوالي 0.25 متر ويستخدم هذا النوع في الجهود حتى 11kV

4- الأعمدة الهيكلية Steel Structure Tower : تتكون هياكلها من زوايا من الحديد المجلفن وتعتبر أفضل من الأنواع السابقة وتتميز بسهولة أعمال الصيانة وتحملها لقوة شد كما أنها تتسم بالثبات بفضل قاعدتها المربعة ، أما الأعمدة الأسطوانية فإنها إذا تعرضت لقوة شد قبل أن تمر فترة كافية على زراعتها وتركيبها فقد تدور حول مركز تثبيتها.

ويمكن تصنيف الأعمدة من حيث مكان العمود في الشبكة ، كالتالي :

6- أعمدة الوسط (عمود التعليق)

يستخدم حيث تكون قوة شد الموصلات متساوية على جانبي العمود أو حيثما لا يكون هناك تغير في اتجاه الخط فيتم تركيبها في المسارات المستقيمة من الخط (شكل 21-4) وتمثل 80% من إجمالي أعمدة الخط. وفي الغالب تترك مسافة 80 متر بين كل عمودين. وبعض هذه الأعمدة تحمل أيضا محولات التوزيع ولمبات الإنارة أيضا.

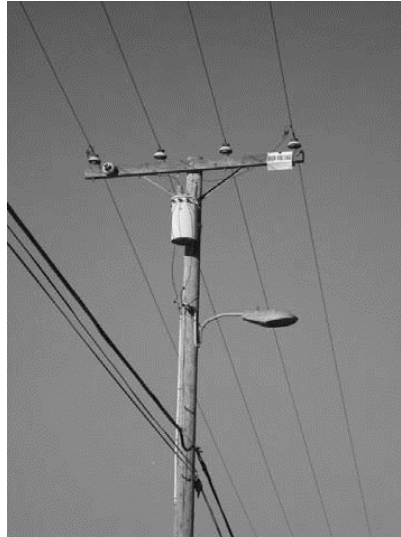


Figure 21-4

7- أعمدة الشد

وهذه تصمم لتحمل الشد من الجهتين بالإضافة إلى تحمل أوزان الموصلات ، وغالبا يستخدم عمود شد بعد كل خمسة أعمدة تعليق ، وكذلك عند تغيير مسار الخط كما فى الشكل 21-5

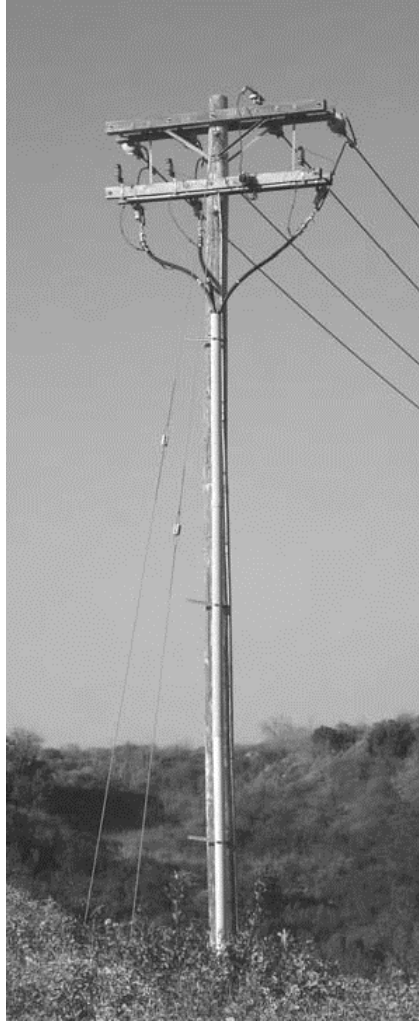


Figure 21-5

عمود بداية أو نهاية الخط الهوائي

تصمم تلك الأعمدة على أنها أعمدة شد من جانب واحد ، وتكون مزودة بعوازل تتحمل قوة شد كما فى الشكل 21-6.

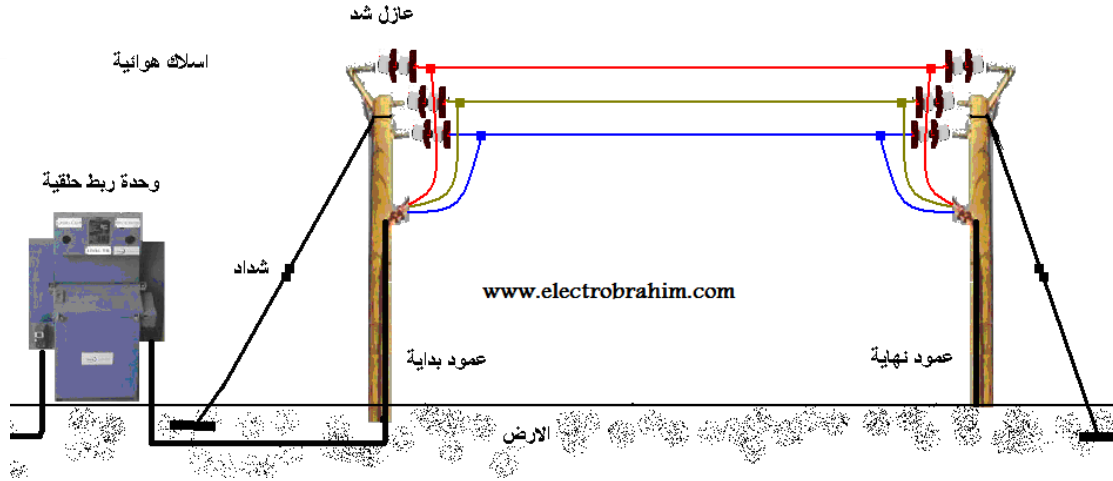


Figure 21-6

21.4 العوازل المستخدمة فى شبكات الجهد المتوسط

وظيفة هذه العوازل هي حمل الموصلات الكهربائية ، وعزل الموصلات عن جسم البرج ، وذلك لمنع حدوث قصر بين الموصلات وبعضها ، أو بين الموصلات والأرض . ويوجد منها عدة أنواع حسب نوع مادة العزل ، فمنها العازل الزجاجي والعازل الخزفي (البورسلين) .

وهناك تصنيف آخر طبقاً لشكل العازل وتركيبه وهو الأشهر فى تصنيف العوازل ، وتصنف فيه العوازل إلى عدة أنواع منها عازل مسمار ، وعازل القرص ، وعازل السلك الشداد.

عازل المسمار :

يستخدم ذلك النوع (شكل 21-7) من عازلات الجهد المتوسط لحمل الموصلات فقط دون تحمل أي قوة شد فيستخدم مع أعمدة التعليق فقط.



Figure 21-7 Pin type insulator

عازل قرص Suspension Insulators

وتسمى أيضا عوازل الطاقة والمسمار والسبب واضح من الشكل 21-8. ويستخدم هذا النوع من العازلات مع أبرج الشد وأبراج الزاوية ، وأعمدة البداية والنهاية ، حيث يركب قرصين في حالة جهد 11kv أو ثلاثة في حالة جهد 22kv وتكون مصممة لتحمل شد الموصلات .



Figure 21-8 Suspension Insulation

عوازل الـ Strain Type:

في نهاية الخط ، أو عند وجود زاوية في المسار ، فسيكون الخط معرضا لقوى شد كبيرة ، فيتم استخدام هذا النوع للتخلص من الشد في الخط . وهو يستخدم في الجهود الأقل من 11 كيلو فولت .



STRAIN TYPE

عوازل الـ Shackle Type

هذا النوع كان يستخدم قديما بدلا من Strain Insulators ، وهو يستخدم حاليا فقط في خطوط نقل الجهد المنخفض . وهذا النوع يمكن أن يستخدم أفقيا أو رأسيا ويمكن أن يثبت مباشرة علي الخط او باستخدام ذراع .



SHACKLE TYPE

عازل السلك الشداد

تستخدم أسلاك صلب لتثبيت الأعمدة كما في الشكل 21-9. وبما أنها صلب فيمكن أن يتسرب تيار خلالها لذا لاحظ وجود عزل في وسط السلك الشداد كما في الصورة لمنع تسرب التيار . وصورته التفصيلية على يمين الصورة.

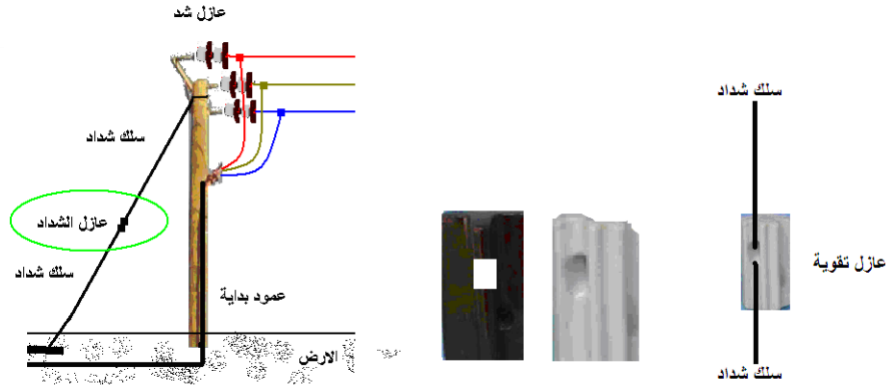


Figure 21-9 سلك شداد

21.5 الأكسسورات المستخدمة فى الشبكات الهوائية

21.5.1 كلامبات الشد Tension clamp

ويتكون من ذراعين ، الذراع الأصغر لا يوجد به مسامير ويكون فى اتجاه الخط الهوائي والذراع الأكبر يوجد به عدد 3 إلى 4 مسامير ، ولذلك يسمى شداد 3 مسمار أو 4 مسمار ويكون فى اتجاه البرج كما فى الصورة. ويجب أن يكون السطح الداخلى للشداد أملس تماما لعدم تجريح السلك أثناء الشد على هذا السطح ، ويفضل تبطين هذا السطح بشريط من الألومنيوم.

الصورة التالية فى الشكل 21-10 تمثل أحد الكلامبات.

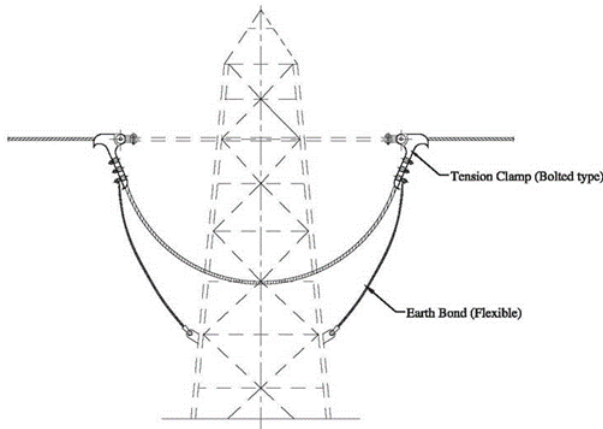


Figure 21-10 كلامبات التعليق

21.5.2 السكاكين

أولاً هناك فرق شاسع بين السكينة Disconnecting Switch وقاطع الدائرة Circuit Breaker كما هو معروف ، وهو أن القاطع يفصل على حمل أو على عطل ، وذلك يدويا في الأحوال العادية ، أو عن طريق أجهزة الوقاية المركبة على الخلية حيث يفصل تيارات الأعطال تلقائياً .
أما السكينة فإنها نوعان :

21.5.3 النوع الأول : السكاكين الهوائية

هذا النوع يفصل في حالة اللا حمل فقط ، و يستخدم في المناورات التي تتم على الخطوط الهوائية سواء للصيانة أو لإصلاح الأعطال أو لتجزئة الخط الرئيسي لتسهيل تحديد مكان العطل حيث يتم تركيب سكينة لكل 3 كم بالخطوط الرئيسية وعند الخطوط الفرعية .

ويتم تركيب السكاكين الهوائية عند بداية الخط الرئيسي وعند بداية التفرعات.



Figure 21-11 سكينة هوائية

وتتكون من ثلاثة أجزاء (شكل 21-11) :

- 1- الجزء الثابت وتسمى الأسلحة الثابتة
- 2- الجزء المتحرك وتسمى الأسلحة المتحركة
- 3- يد السكينة ومتصلة بماسورة حديد بطول 6 متر لتسهيل عملية الفصل والتوصيل من الأسفل إذا كانت معلقة على عمود.

سعة السكاكين المستخدمة

بالمصهرات عند التفرعات والمحولات المعلقة	200 أمبير
لتجزئة الخط الرئيسي	400 أمبير
عند بداية الخط الرئيسي	630 أمبير

21.5.4 النوع الثاني : Load Break Switch

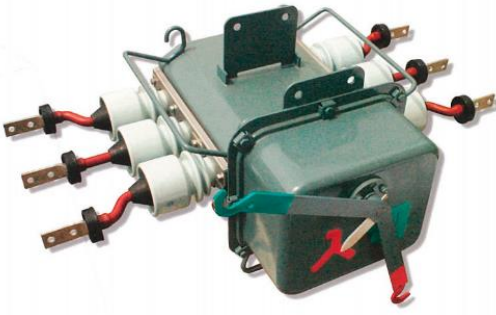


Figure 21-2112 LBS

وهناك نوع آخر من السكاكين يمكنه الفصل على الحمل لكنه لايمكنه الفصل على العطل ، وهو مايسمى Load Break Switch . والنوع الظاهر في الصورة شكل 12-21 معزول بغاز الـ SF6 (هناك أشكال أخرى عديدة).

21.6 الموصلات المستخدمة بشبكة الجهد المتوسط

معظم الموصلات المستخدمة في الخطوط الهوائية تكون عبارة عن أسلاك مجدولة بطريقة حلزونية ويكون اتجاه جدل الأسلاك في كل طبقة مخالفا لاتجاه الجدل في الطبقة السابقة .

وبالإضافة إلى الموصلات المجدولة المصنوعة من النحاس أو من سبيكة النحاس ويوجد عدد أنواع من الموصلات الألومنيوم والتي تعطى أفضل الحلول لمتطلبات خطوط النقل الهوائية في الظروف المختلفة ولكن من عيوب الألومنيوم أن نقطة انصهاره منخفضة فيتأثر بدرجة أسرع بتيارات القصر ، ولذا يجب إضافة النحاس أو الصلب للألومنيوم لتحسين بعض خواصه.

وهذه بعض الأنواع المستخدمة من الموصلات.

- موصلات الألومنيوم فقط (ALL Aluminum Conductor)
- الألومنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Reinforced (ACSR)
- موصلات سبائك الألومنيوم All-Aluminum Alloy Conductor (AAAC)
- الألومنيوم المقوى بسبيكة الألومنيوم Aluminum Conductor Aluminum Reinforced (ACAR)
- سبيكة الألومنيوم المقوى بالصلب Aluminum Conductor Steel Supported (ACSS)

ويتم اختيار مساحة مقطع الموصل طبقا للأحمال المطلوب توصيل التيار الكهربائي لها ، وكذلك نوع الحمل حتى لا يؤثر على قيمة الهبوط في الجهد . وأشهر الأنواع المستخدمة هي الألومنيوم المدعوم بالصلب كما ذكرنا في شبكات النقل . وأشهر المقاسات المستخدمة في شبكات التوزيع هي :

6/35 مم² ، 8/50 مم² ، 12/70 مم² ، 15/95 مم² ، 21/ 120 مم² ، 25/150 مم²

ومعنى 6/35 حسب مواصفات الـ DIN أن الموصل يتكون من جزئين:

- ألومنيوم بمساحة مقطع 35مم²
- الصلب بمساحة مقطع 6 مم²

والجدول 1-21 يظهر بعض خصائص هذه الكابلات وعدد الأسلاك (المقطع الواحد مكون من عدد من الشعرات) المستخدمة من كل مادة داخل المقطع الواحد ومساحة مقطع كل سلكة من هذه الأسلاك.

Table 21-1

Egytech - code	Nominal cross sectional area mm ²	Number and nominal diameters of wires		Max. DC. resistance at 20 °C Ω/km	Calculated breaking load kn	Approx. overall diameter mm	Approx. weight kg/km
		Aluminium nr x Ø (mm)	Steel nr x Ø (mm)				

a - According to DIN 48204

AC0-T001-U11	16 / 2.5	6 x 1.80	1 x 1.80	1.8750	5.62	5.4	62
AC0-T001-U12	25 / 4	6 x 2.25	1 x 2.25	1.2060	8.39	6.8	97
AC0-T001-U13	35 / 6	6 x 2.70	1 x 2.70	0.8365	11.92	8.1	139
AC0-T001-U14	50 / 8	6 x 3.20	1 x 3.20	0.5941	16.72	9.6	196
AC0-T001-U15	70 / 12	26 x 1.80	7 x 1.45	0.4130	24.97	11.6	276
AC0-T001-U16	95 / 15	26 x 2.10	7 x 1.65	0.3058	32.19	13.4	369
AC0-T001-U17	120 / 21	26 x 2.45	7 x 1.95	0.2530	41.43	15.7	507
AC0-T001-U18	150 / 25	26 x 2.70	7 x 2.15	0.1939	52.34	17.3	630
AC0-T001-U19	185 / 32	26 x 3.00	7 x 2.40	0.1640	64.78	19.2	762
AC0-T001-U21	210 / 36	26 x 3.20	7 x 2.55	0.1410	73.44	20.5	865
AC0-T001-U20	240 / 40	26 x 3.40	7 x 2.70	0.1188	82.58	21.7	974
AC0-T001-U31	380 / 50	54 x 3.00	7 x 3.00	0.0757	120.90	27.0	1448

Cables - code name	Nominal cross sectional area mm ²	Number and nominal diameters of wires		Total cross-sectional area mm ²	Max. DC. resistance at 20 °C Ω/km	Calculated breaking load kn	Approx. overall diameter mm	Approx. weight kg/km
		Aluminium nr x Ø (mm)	Steel nr x Ø (mm)					

b - According to BS 215

Gopher	25	6 / 2.36	1 / 2.36	30.62	1.0930	9.61	7.08	106
Weasel	30	6 / 2.59	1 / 2.59	36.88	0.9077	11.45	7.77	128
Ferret	40	6 / 3.00	1 / 3.00	49.48	0.6766	15.20	9.00	172
Rabbit	50	6 / 3.35	1 / 3.35	61.70	0.5426	18.40	10.05	214
Horse	70	12 / 2.79	7 / 2.79	116.20	0.3936	61.20	13.95	538
Dog	100	6 / 4.72	7 / 1.57	118.50	0.2733	32.70	14.15	394
Wolf	150	30 / 2.59	7 / 2.59	194.90	0.1828	69.20	18.13	726
Dingo	150	18 / 3.35	1 / 3.35	167.50	0.1815	35.70	16.75	506
Lynx	175	30 / 2.79	7 / 2.79	226.20	0.1576	79.80	19.53	842
Caracal	175	18 / 3.61	1 / 3.61	194.50	0.1563	41.10	18.05	587
Panther	200	30 / 3.00	7 / 3.00	261.50	0.1363	92.25	21.00	974
Jaguar	200	18 / 3.86	1 / 3.86	222.30	0.1367	46.60	19.30	671
Zebra	400	54 / 3.18	7 / 3.18	484.50	0.0674	131.90	28.62	1621

وعند إنشاء الخطوط يراعى الآتى :

- 1- استخدام الموصلات 6/35 مم² ، 12/70 مم² للخطوط الفرعية بأطوال 5 كم ، 15 كم على الترتيب.
- 2- استخدام الموصلات 25/150 مم² للخطوط الرئيسية لمسافة 20 كم كحد أقصى .

ويجب أن نلاحظ أن الأسلاك تتمدد في فصل الصيف وتتكشف في فصل الشتاء ولذلك عند حساب الطول الكلى اللازم للخط نضيف مترا لكل 100 متر طول لدواعى الـ Sag الذى يظهر فى الصورة التوضيحية شكل 21-13.

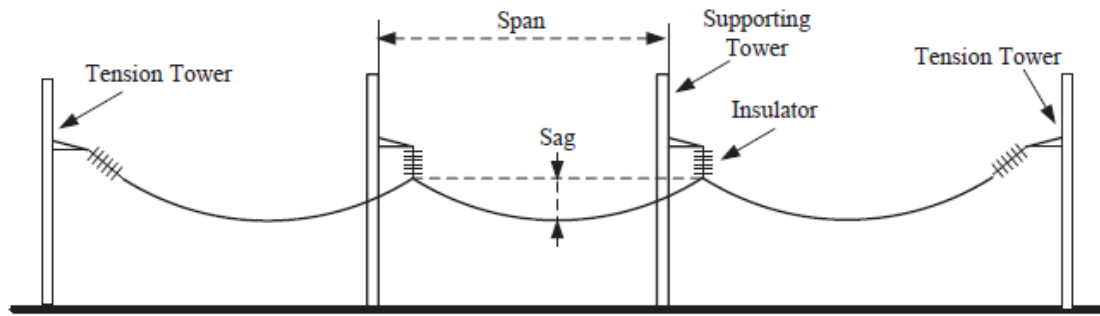


Figure 21-13

وعموما فإن أقل مسافة وهي الموجودة عند أكثر نقطة انخفاضاً بين الموصل والأرض في الشبكات جهد 11 kV يجب ألا تقل عن 6 متر ، وإذا تقاطع مع طريق فلا بد أن تكون المسافة 8 متر أو أكثر.

21.7 أجهزة الفصل وإعادة التوصيل التلقائي RECLOSER

في التجمعات الصغيرة مثل القرى والمزارع والصحارى وما يشابهها تكون التغذية دائماً عبارة عن خط هوائى لأنه يصعب تمديد الكابلات بالأرض حيث الفلاحين يقومون بعزق الأرض بالفؤوس ، ومن ثم فهناك خطورة من تواجد الكابلات بالأرض ، ولذا يتم نقل الجهد عن طريق الخطوط الهوائية . ونتيجة لأن الأحمال صغيرة فيتم تغذية الأحمال بواسطة محولات تتركب على الأعمدة.

والمشكلة في مثل هذه الأنظمة هو تعرض الخطوط لأعطال عابرة مثل حدوث تلامس عابر بسبب الأمطار أو الطيور أو أغصان الأشجار ، وقد تكون أعطال دائمة نتيجة سقوط أحد الأسلاك أو قطع أو إنهيار عزل أحد المحولات الكثيرة المتصلة على الخط .

وحيث أن هذا الخط يكون محمياً في أوله فقط من ناحية محطة التحويل الرئيسية بقاطع و أجهزة الوقاية فإن كل عطل من الأعطال السابق ذكرها يؤدي إلى فصل القاطع الرئيسي وهذا يؤدي إلى انقطاع التغذية عن عدد كبير من المشتركين رغم أن العطل قد يكون في واحدة فقط من عشرات التفريعات على الخط وقد يكون كما ذكرنا عطلاً مؤقتاً.

ولتفادي حدوث ذلك فإننا نستخدم جهاز فصل وإعادة توصيل أتوماتيكي Recloser شكل 21-14، وهو مشابه للقاطع في عمله، بل هو فعلا قاطع ولكنه يتميز بأنه يمكنه أن يعيد توصيل نفسه (من مرة إلى ثلاث مرات بعد زمن معين) وفي المرة الأخيرة لا يعيد توصيل نفسه .

ملحوظة : الصندوق الصغير يمين العمود يوضع به دائرة التحكم في الـ Recloser .



Figure 21-14 Recloser

والشكل 21-15 يمثل أداء هذا الجهاز عندما يضبط على فصل وإعادة توصيل لثلاث مرات.

عند حدوث عطل بالخط الهوائي يتم الفصل بعد زمن الفصل المحدد (0.3 ثانية لجهاز التفريضة ، 0.5 ثانية لجهاز بداية الخط) ثم يقوم الجهاز بإعادة التوصيل للخط بعد زمن معين (زمن يتم تحديده في كل مرة توصيل من المرات الثلاث وعلى سبيل المثال 1 ثانية ، 3 ثانية ، 10 ثانية) فإذا تكرر الفصل مرة رابعة فإن الجهاز يقوم بفصل كامل للخط ولا يتم الإعادة إلا بعد عمل Reset للجهاز يدويا . والصورة التالية في الشكل 21-16 تمثل محول ومعه Recloser على عمود توزيع واحد.

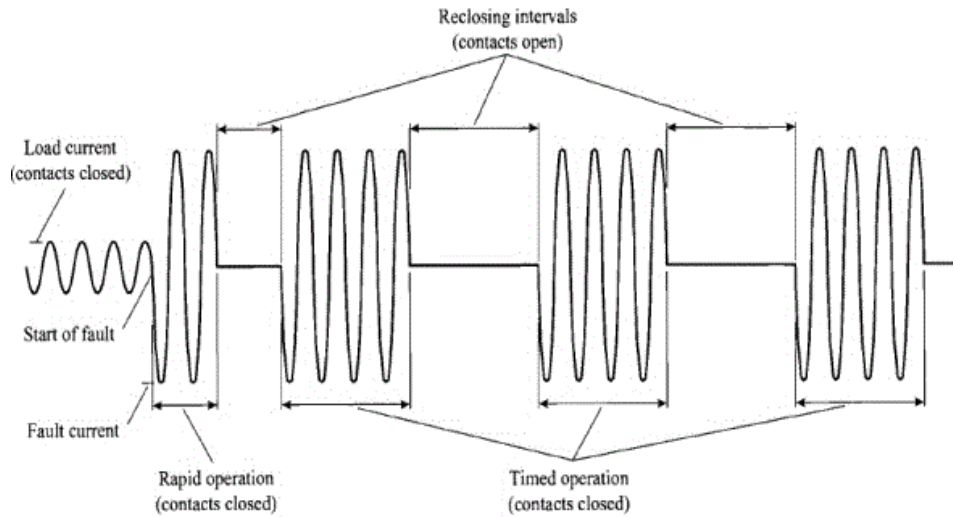


Figure 21-15 Recloser timing



Figure 21-16 Transformer and Recloser

21.8 مانعة الصواعق

توضع مجموعة مانعة الصواعق فى بداية ونهاية الخط الهوائى للجهد المتوسط وكذلك عند كل محول. وتوضع أيضا على كل جهاز فصل وإعادة التوصيل الأتوماتيكي Recloser ، وعلى منظمات الجهد الأتوماتيكية AVR ، ومكثفات الجهد المتوسط وذلك لتفريغ الشحنة الكهربائية للصواعق التى قد تضرب الشبكة الهوائية.



Figure 21-16

وهى عبارة عن مقاومة غير خطية ذات مقاومة عالية فى الأحوال العادية بينما تقل قيمتها عند زيادة الجهد (راجع تفاصيل أكثر عنها فى الباب الثالث الخاص بمحطات التحويل). وتثبت

مانعة الصواعق (شكل 21-16) على قمة برجى البداية والنهاية مع توصيل قواعد المجموعة بأرضى جيد.

21.9 أجهزة مبيّنات الأعطال

نظرا لطول الخط الهوائي الذي يصل أحيانا إلى أكثر من 50 كيلو متر فإنه يتم تركيب بعض الأجهزة على الأسلاك الهوائية لتعطي علامة بيان على هيئة ضوء أو فلاش عند حدوث عطل بالخط الهوائي ، وذلك لسرعة تحديد الاتجاه الذي تم حدوث العطل به، فالشبكة الهوائية يمكن أن يكون بها تفرّعات في اتجاهات متعددة كما رأينا في الشكل 21-1 في بداية هذا الفصل .



Figure 21-17 Fault indicator

ويتم رؤية الضوء الصادر من هذا الفلاش على بعد يتراوح بين 300 إلى 400 متر بالنهار أما في الليل يتم رؤيتها على بعد كيلو متر . ويفضل أن يركب ذلك الجهاز (شكل 21-17) بعد التفرّعة أو نقطة التقسيم.

ويوجد نوعان من هذه الأجهزة : نوع يركب على الأسلاك الهوائية مباشرة ، ونوع آخر يركب على الأعمدة.

وفكرة عمله أنه عند وجود تلامس ثلاث خطوط مع بعض يتم تشغيل كل أجهزة البيان من نقطة العطل إلى المصدر لتبين مكان واتجاه العطل أما إذا حدث التلامس بين خطين فإن مبيّنات الأعطال الخاصة بهذين الـ Two Phases فقط يضيئوا مثل السابق من المصدر وحتى العطل ، ومن ثم يسهل تحديد اتجاه العطل لاسيما إذا كان لدينا شبكات بها تفرّعات عديدة. وبالطبع ففي الوضع الطبيعي تكون كافة المبيّنات مطفأة. مع ملاحظة أن فكرة هذه المبيّنات مبنية على مبدأ زيادة التيار ، بمعنى أنه كلما زاد تيار العطل كلما كان الضوء أكثر وضوحا ، فإذا كان تيار العطل منخفضا تصبح هذه المبيّنات عديمة الفائدة كما في حالة High-Impedance faults .

والشكل 21-18 يظهر عطلا من النوع الـ SLG ، وهذا واضح بدليل وجود لمبات فازة واحدة فقط مضيئة من المصدر للعطل. ويتم فصل القاطع لفصل الخط بالكامل مع استمرار إشارة الفلاش على طول الخط من نقطة العطل حتى بداية الخط.

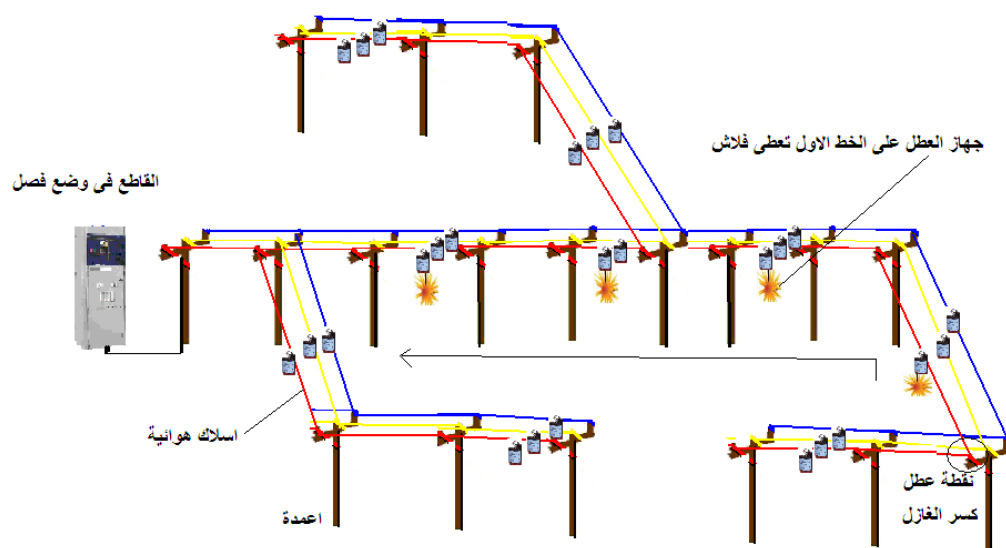


Figure 21-18 مبينات الأعطال في شبكة هوائية بها عطل على فارة واحدة



ويوجد أنواع أخرى من مبيّنات الأعطال تعمل من خلال إرسال إشارات لاسلكية (شكل 21-19) لتسهيل الوصول إلى أماكن القصر ، وكل ذلك لتقليل فترات إصلاح الأعطال وتحسين جودة التغذية الكهربائية.

Figure 21-19 مبین أعطال لاسلکی

21.10 الأرضى فى شبكات التوزيع



يتم توصيل خط أرضى أعلى الأبراج و تأريضه فى بدايات الخط و ذلك للحماية من البرق و لتفريغ أي شحنات متجمعة بعيدا عن الشبكة. كما فى خطوط النقل وكما هو واضح فى الصورة شكل

. وهذا النوع من الأرضي يسمى أرضي هوائي ، ويستخدم عندما تكون التربة صخرية أو رملية ، وهو عبارة عن موصل رابع بمساحة مقطع 70 مم² نقوم بتركيبه على الأبراج مباشرة بدون عوازل ، ثم يتم عمل آبار الأرضي عند أبراج البداية والنهاية للخط الهوائي لتوصيل الأرضي بها ، وكذلك كل 1 كم طوال مسار الخط.

وفى هذه الآبار يتم تركيب إلكترود نحاس داخل البئر ويربط عند سطح الأرض بسلك نحاس مساحة مقطعة 70 مم² عن طريق كلمبات و الطرف الآخر للسلك يتم توصيله بالأرضي الهوائي ، ويمكن زيادة عدد الإلكترودات للوصول إلى أقل مقاومة للتربة لتكون فى حدود 5 أوم كحد أقصى.

وهناك أرضى خاص بالأبراج نفسها وهو عبارة عن ماسورة من الحديد الصلب المجلفنة يتم تثبيتها فى الأرض ثم توصيل الطرف العلوي للماسورة بسلك نحاس مساحة مقطعه 50 مم² والطرف الآخر للسلك يتم تثبيته بالبرج كما فى الصورة شكل 20-21.

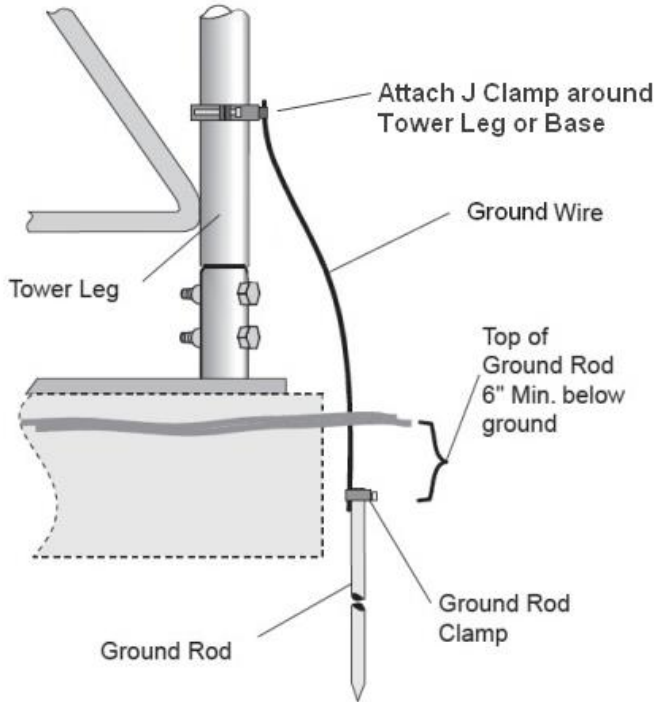


Figure 21-20 Earthing poles

ملحوظة:

يستخدم الأرضي المؤقت Temporary Earthing أثناء عمليات الصيانة وإصلاح الأعطال ، وذلك لتأمين القائمين على العمل ، فعند القيام بعمل صيانة أو إصلاح عطل بجزء من الخط الهوائى يتم تركيب أرضى مؤقت فى بداية الخط (بداية تغذية الخط) ويتم كذلك تركيب أرضى مؤقت قبل منطقة العمل وتركيب أرضى مؤقت بعد منطقة العمل .

21.11 المشاكل التي تتعرض لها الخطوط الهوائية بشبكة التوزيع

- 1- انقطاع الكبارى Jumpers بالخط واحتراقها أحيانا بسبب الرخاوة في الربط حيث تزداد درجة حرارتها بزيادة التيار المار فيها خصوصا إذا كانت هذه الزيادة نتيجة لأعطال متكررة بالخط.
- 2- وجود أشجار في مسارات الخطوط تتسبب حركة فروع الشجر في عمل قصر بالدائرة الكهربائية.
- 3- نقص العازلية نتيجة لتراكم الغبار على العوازل مما يؤدي إلى انقطاع التغذية.
- 4- سقوط أعمدة الخطوط نتيجة لهطول الأمطار والرياح أو بواسطة حركة المرور .
- 5- إنقطاع أحد الموصلات وتلامسه بالأرض من ناحية الأحمال (أعطال عالية المقاومة) مما يتسبب صعوبة فصل المغذى بجهاز الوقاية ويتسبب في حدوث وفيات نتيجة الصعق بالكهرباء .
- 6- مرور الخطوط الهوائية داخل المناطق المأهولة بالسكان .
- 7- سوء توزيع الأحمال وانخفاض الجهد (لاسيما فى القرى) .
- 8- نتيجة زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا فى وقت الذروة وارتفاع التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدى لانخفاض الجهد عند المستهلك
- 9- عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدى أيضا إلى زيادة voltage drop
- 10- وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها او بين الكابلات والبارات حيث أنه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة فى هذه المناطق مما يؤدى إلى زيادة voltage drop

22

دراسات هامة في شبكات التوزيع

هذا الفصل يشتمل على أربعة مواضيع:

- 1- الاعتمادية وطرق حسابها
- 2- تنظيم الجهد في شبكات التوزيع
- 3- التحكم في شبكات التوزيع
- 4- نظم الاتصالات في شبكات التوزيع

22.1 الاعتمادية في الشبكات

في الأجزاء السابقة تعرضنا لطرق تخطيط شبكات توزيع الجهد المتوسط وكذلك تخطيط الشبكات الثانوية بما تشتمل عليه من محولات وخلافه. والحقيقة أن النماذج التي عرضت تمثل فقط أشهر الطرق للتوصيلات لكن يمكن عمل أشكال أخرى عديدة لربط عناصر شبكة التوزيع سواء في منطقة الجهد المتوسط أو في منطقة الجهد المنخفض أو فيهما معا .

والفرق بين هذه الشبكات هو في نسبة الاعتمادية Reliability المطلوبة وما يترتب على ذلك من تكلفة التصميم فكلما زادت الاعتمادية زادت التكلفة وزاد تعقيد التصميم ، ومن هنا كانت النقطة الأولى التي يجب على المصمم أن يحسبها هي : ماهو شكل الشبكة التي تحقق درجة الاعتمادية المطلوبة ؟

22.1.1 الفرق بين الـ Reliability & Power Quality

يجب في البداية توضيح الفرق بين الاعتمادية Reliability ، و بين الـ Power Quality وذلك لتقارب المفهومين :

- فأما الـ Power Quality "جودة الطاقة الكهربائية" فتعنى مدى مطابقة موجة الجهد التي تظهر للعميل للـ ideal sinewave المتعاقد عليها مع الشركة من حيث عدم وجود voltage fluctuations أو تشوه في شكل الموجة نفسها بسبب وجود بعض الـ harmonics مثلا .
- أما الاعتمادية "reliability" فيقصد بها مدى حدوث انقطاع في الخدمة لمدد تتجاوز الخمس دقائق وذلك طبقا لمقاييس معينة سنتعرض لها في الأجزاء التالية.
- ملحوظة: إذا كانت مدة انقطاع الخدمة تقل عن خمس دقائق فإنها تعتبر من مشاكل الـ Power Quality وليست من مشاكل الاعتمادية.

مؤشرات الاعتمادية في الشبكات :

System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء لفترة محددة قد تكون شهرا أو سنة أو حتى يوم واحد و هو الأكثر استخداما لتحديد الـ sustained interruption. ولحساب هذا المؤشر فإننا نقسم إجمالي عدد ساعات الانقطاع على عدد العملاء الكلي . ويقاس SAIDI بالدقائق أو الساعات وغالبا ما يتم قياسها خلال العام.

مثال توضيحي : حدث ثلاثة انقطاعات للخدمة في يوم 1 يناير وهذه الانقطاعات كالتالي :

1. عدد 10 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 90 دقيقة
2. عدد 1000 عميل تم قطع الخدمة عنهم لمدة 20 دقيقة
3. عدد 3 عملاء تم قطع الخدمة عنهم لمدة 175 دقيقة

وبفرض أن عدد العملاء الكلي 30000 ، إذن تكون قيمة الـ SAIDI يساوي

$$0.714 = 30000 \div (175 \times 3 + 20 \times 1000 + 90 \times 10)$$

System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

و هذا المؤشر يحسب نسبة احتمالية قطع الخدمة عن أى عميل في مدة معينة ، ويساوى عدد العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم مقسوما على عدد العملاء الكلي . و من المثال السابق فإنه يساوى $0.0337 = 30000 \div 1013$ في يوم 1 يناير .

Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط مدة انقطاع الخدمة عن العملاء الذين تم قطع الخدمة عنهم ولحسابه من المثال السابق فبدلا من أن يكون المقام 30000 فإنه يصبح 1013 ، حيث يمثل هذا الرقم إجمالي العملاء الذين تأثروا فعلا بالانقطاعات و بالتالي يصبح الـ CAIDI يساوى 21.15 دقيقة

ملحوظة:

$$CAIDI = SAIDI / SAIFI$$

Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI) –

و هذا المؤشر يشير إلى متوسط عدد مرات فصل الخدمة عند العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم في مدة محددة ويساوى (عدد مرات فصل الخدمة ÷ عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم) ومن المثال السابق فإنه يساوى $0.00296 = 1013 \div 3$

Customer Interrupted per Interruption Index (CIII) –

هذا المؤشر يعطى متوسط عدد العملاء الذين تم فصل الخدمة عنهم عند انقطاع التيار الكهربى . ولحساب هذا المؤشر نستخدم القانون التالي

عدد الأفراد الذين تم فصل الخدمة عنهم مقسوما على عدد مرات انقطاع التيار الكهربى . ومن المثال السابق فإنه يساوى $337.66 = 3 \div 1013$

وهذه المؤشرات التى ذكرناها أنفا هى المقياس الحقيقى للاعتمادية فى أى شبكة والتى ينبغى معرفة قيمتها جيدا حتى يمكننا مقارنة أداء الشبكة فى الوقت الحاضر مقارنة مع أدائها فى وقت سابق لمعرفة ما إذا كان هناك تحسن أم لا . كذلك تساعد هذه المؤشرات فى تحديد أماكن الضعف فى الشبكة والتى ينبغى تحسينها حتى نصل بالأداء إلى أفضل مستوى ممكن .

ولكى تعبر هذه المؤشرات عن أداء الشبكة الحقيقى ينبغى قبل حسابها أن نحذف الأحداث الكبرى major events من بيانات الشبكة التى تستخدم فى استنتاج هذه المؤشرات. وهذه الـ major events لها تعريفات كثيرة و لكن باختصار هى الأيام التى تحدث فيها أعطال كثيرة تزيد عن حد معين يتم تحديده حسب التعريف والتى تكون بسبب مؤثر خارجى عن الشبكة كالزوابع والاعاصير والفيضانات . فالأعطال التى تحدث بسبب من هذه الأسباب لا يمكن أخذها فى الاعتبار فهى لا تعبر بحال من الأحوال عن أداء الشبكة و بالتالى لا يمكن الاستفادة منها .

ومن العوامل الأخرى التى تؤثر فى الاعتمادية فى الشبكات :-

- circuit length فكلما زاد طول الشبكة زادت احتمالية تعرض الخدمة للانقطاع وبالتالي قلت الاعتمادية لهذه الشبكة .
- Circuit configuration فشكل الشبكة من الداخل يؤثر بشكل كبير على الاعتمادية لهذه الشبكة ، فالشبكة الـ Ring مثلا تكون مدد الأعطال فيها أقل بكثير من الشبكات الـ Radial.

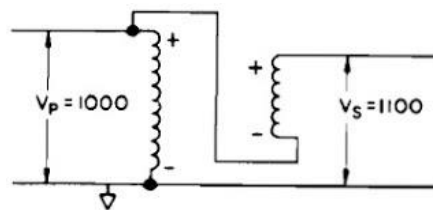
22.2 تنظيم الجهد فى شبكات التوزيع Voltage Regulation

تعتبر منظمات الجهد الأتوماتيكية أو الـ Automatic Voltage Regulator (AVR) من أهم وسائل المحافظة على قيمة الجهد ثابتة ، ويتم تركيبها فى المناطق التى ينخفض بها الجهد نتيجة المسافات الطويلة للخطوط الهوائية وخصوصا فى أوقات ذروة الأحمال . وهو يشبه المحول العادى من حيث الشكل الخارجى ، أما تركيبه الداخلى فهو محول من النوع الـ auto Transformer ونستعرضه فى الجزء التالى.

22.2.1 فكرة عمل منظم الجهد

تبنى فكرة عمل منظم الجهد الأتوماتيكي على استخدام محول ذاتى Auto Transformer مكون من ملف واحد مقسم إلى جزئين من الملفات على قلب حديدى واحد . وهناك نوعين من منظم الجهد الأتوماتيكي AVR الأول يستخدم فى شبكة الجهد المتوسط وهو من النوع الميكانيكي فى جزء التحكم كما سنرى ، والثانى يستخدم فى الجهد المنخفض وغالبا يكون التحكم فيه كهربيا وليس ميكانيكيا . وهناك أيضا فروق فى التركيب فضلا عن الفروق فى الاستخدام. فالـ AVR المستخدم فى الجهد المنخفض يكون الهدف منه حماية المستهلكين من الارتفاع أو الانخفاض المفاجئ فى الجهد. أما حديثنا فى هذا الجزء فسيتركز فقط على الـ AVR المستخدم فى شبكات الجهد المتوسط بغرض علاج مشكلة الهبوط فى الجهد .

وفكرة الـ AVR أنه محول مكون كما ذكرنا من ملفين ابتدائى وثانوى مثل أى محول لكن الجديد هنا أن الملفين متصلين ببعض على التوالى بطريقة يمكن أن تودى إما إلى جمع جهدى الملفين معا Boost ، أو طرحهما Buck ، على سبيل المثال لو لدينا محول 1000/100 فإن الجهد الناشئ من توصيل الملفين معا بطريقة جمعية يساوى 1100 فولت بينما ستكون القيمة إذا وصلا معا بطريقة الطرح تساوى 900 فولت ، وهذا يعنى أن هذا المحول يمكنه تغيير الجهد الخارج منه بنسبة 10% زيادة أو نقصان كما فى الشكل 22-1 .



Step-up Autotransformer (Boost)

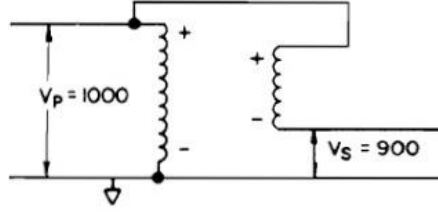


Figure 22-1

Step-down Autotransformer (Buck)

ويمكن إضافة Taps على ملفات الجهد الأعلى ليتم الفصل والتوصيل على درجات وليس فقط بين الأطراف النهائية كما فى الشكل ، مما يعطى مجالا أوسع لتغيير قيمة الجهد فى الجهة الأخرى.

وتتم عملية التحكم فى الفصل والتوصيل لهذه الملفات بطريقة كهربية/ميكانيكية ، فهذه الأجهزة تكون مزودة بمعالج دقيق Microprocessor لتقدير حجم الهبوط فى الجهد ومن ثم تقدير المقدار المطلوب رفعه بواسطة الـ AVR . وبناء على الحسابات السابقة ترسل إشارة إلى محرك كهربى Motor كما فى الشكل 22-2 ليقوم بنقل نقاط التوصيل ميكانيكيا حسب المطلوب سواء بالدوران يمينا أو يسارا وبالتالي يزيد الجهد أو ينخفض.

والأنواع الحديثة تكون أيضا مزودة بنظم اتصالات لتتم عملية التغيير عن بعد وبالتالي التحكم فى الجهد وضبط قيمه أوتوماتيكيا.

وغالبا لا تزيد نسبة التغيير المسموح بها فى شركات التوزيع عن $\pm 10\%$ من قيمة جهد الدخل ، ويتم التقسيم على 32 خطوة (16 خطوة منهم بالزيادة و16 خطوة بالنقصان) فإذا قسمت 10% على 16 خطوة ستجد أن نصيب الخطوة الواحدة يساوى $5/8\%$ من قيمة الجهد. ويوجد من هذه الأجهزة نوعان : Single and Three phase Voltage regulators .

والعيب الأساسى لهذه الأجهزة هو البطء فهى تحتاج على الأقل إلى 15 ثانية لتنتقل من توصيلة لأخرى وهذا زمن طويل فى حالة حدوث عارض مفاجئ لكنه مقبول فى الظروف الطبيعية. (ملحوظة : هناك أنواع حديثة يصل سرعة التغيير إلى حوالى ربع ثانية ، لكنها حتى الآن غير موجودة بالشبكة فى مصر).

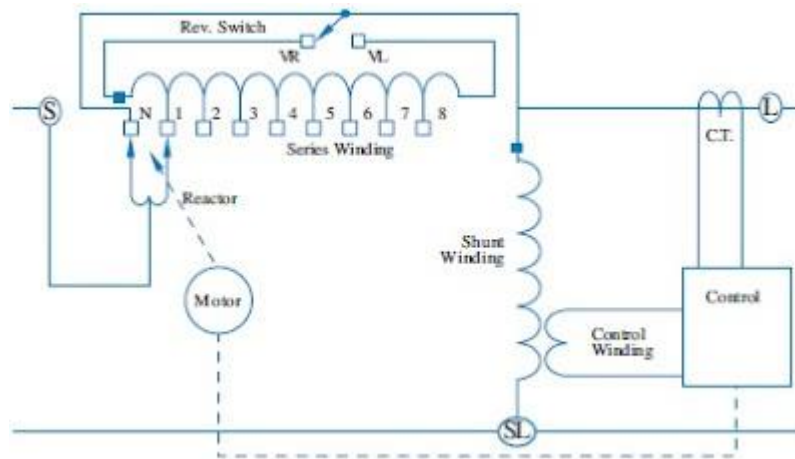


Figure 22-2

Step Voltage Regulator Schematic Diagram

22.2.2 مثال تطبيقي لتقدير حجم الـ AVR

يقدر حجم الـ AVR بوحدات الـ KVA فكيف يتم حساب ذلك؟

يحتاج الأمر إلى معرفة نسبة التغيير في الجهد المطلوبة ولتكن مثلا $\pm 10\%$ ، ثم نحتاج أيضا لمعرفة الجهد المقتن System phase voltage ، ومعرفة قيمة أقصى تيار حمل Max Load current . ثم بضرب الثلاث قيم السابقة معا نحصل على القدرة المقتننة للـ AVR per Phase .

Example:

Compute for the step-voltage regulator size needed by a 3-phase, 4-wire multi-grounded feeder with a system voltage of 13800Y/7970 V. The required voltage regulation is 10% and the peak connected load is 6.0 MVA.

Solution:

- Voltage regulation = 10%
- Phase voltage is the line-to-neutral voltage = 7.97 kV (since it is a 4-wire multi-grounded wye feeder)
- Load current = $6.0 \text{ MVA} / (1.732 \times 13.8 \text{ kV}) = 251 \text{ A}$
- Voltage Regulator kVA Size = $10\% \times 7.97 \text{ kV} \times 251 \text{ A} = 200 \text{ kVA}$

Use three 32-step voltage regulators, each with a standard rating of 250 kVA, 7970 V, $\pm 10\%$ regulation

والشكل 22-3 يمثل مخطط حقيقي لأحد أنواع AVR ويمكن رؤية قيم نسبة التغير المتاحة حسب نقطة التوصيل في الجدول الظاهر بنفس الشكل.

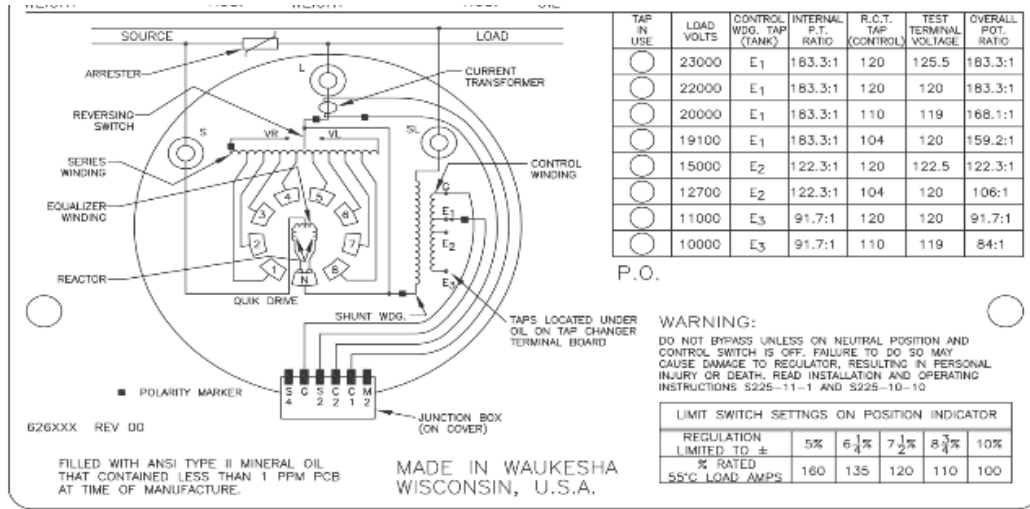


Figure 22-3

وتثبت أجهزة الـ AVR في الشبكات الهوائية على أعمدة خشبية أو معدنية كما في الشكل 22-4 وهي تشبه في الشكل الخارجي المحولات العادية.



Figure 22-4 Voltage Regulator with overhead system

أما في الشبكات الأرضية فيوضع في صناديق تشبه صناديق التوزيع كما في الشكل 22-5.



Figure 22-5 Voltage regulator with underground system

ويمكن مراجعة المزيد عن محولات الـ Auto Transformer في كتابي "المرجع في محولات القوى".

وهذه صورة في الشكل 22-6 مفصلة للـ AVR .

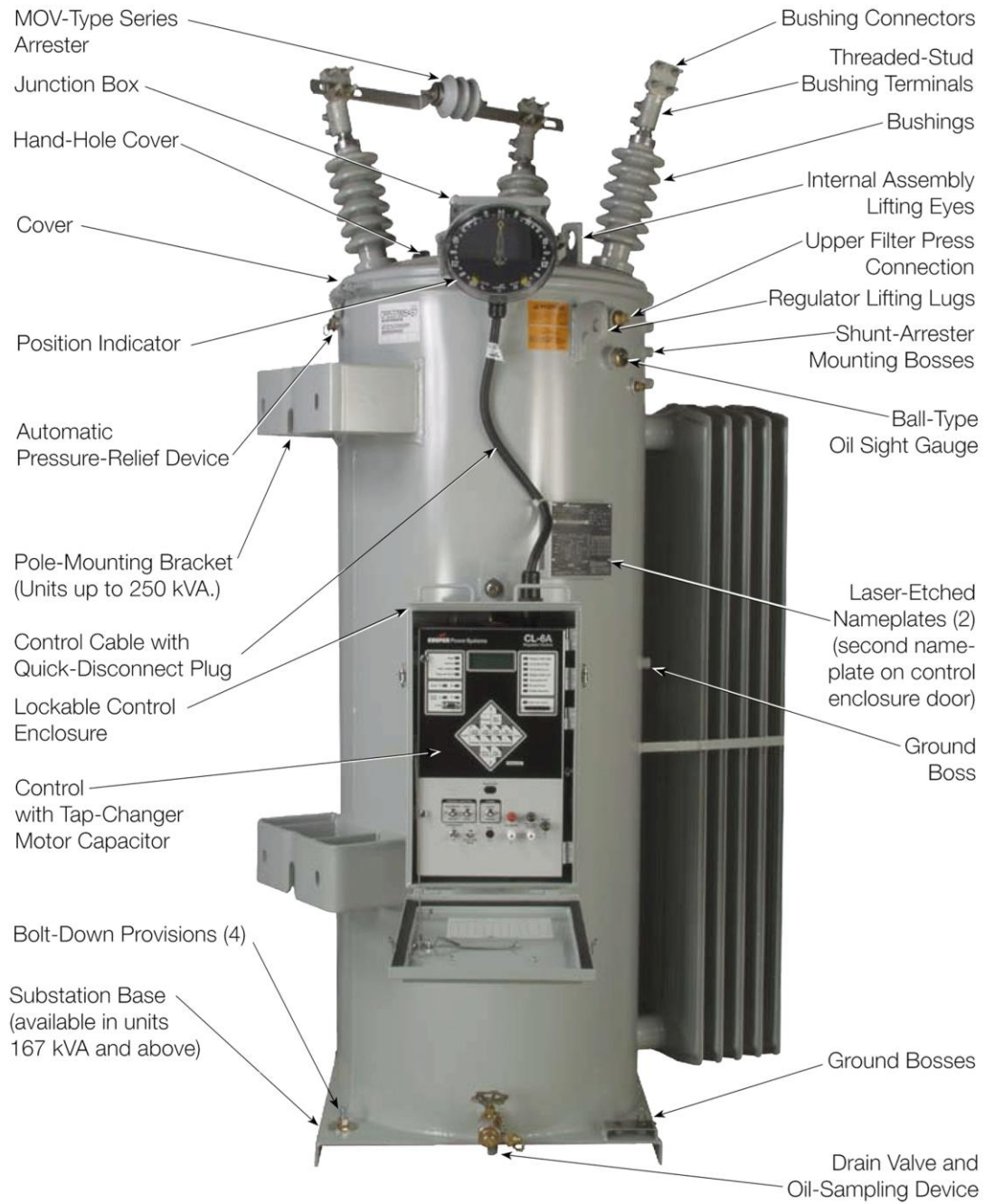


Figure 22-6

22.3 التحكم فى شبكات التوزيع

22.3.1 تعريف الـ Distribution Automation:

الـ Distribution Automation له عدة مفاهيم ومعانى مختلفة كما أن له العديد من التطبيقات المتنوعة ، فقد نقصد به نظام اتصال على مستوى التوزيع يمكننا من التحكم فى الأحمال وتقليل قيمة $peak$ مثلا ، أو قد يمثل محطة تحكم عن بعد فى محطة التوزيع ذات قدرة على اتخاذ القرارات مثل فتح أو غلق بعض الدوائر .

يوجد نوعان من التحكم فى شبكات التوزيع:

1. التحكم فى شبكة الجهد المتوسط وذلك عن طريق الموزعات. ويتم عليه التحكم من داخل مراكز للتحكم فى شركات التوزيع المختلفة.
2. التحكم فى شبكات الجهد المنخفض وذلك عن طريق العداد الذكى المركب عند العميل.

يستخدم نظام التحكم سواء فى محطات التحويل الكهربى أو فى شبكات التوزيع مجموعة من الأجهزة المختلفة تعمل معا كمنظومة متكاملة. من أهمها :

22.3.2 أجهزة الـ IED

أدى التطور الهائل فى انظمة المعالجات الدقيقة (Microprocessors) إلى انتشار الأجهزة الذكية المعروفة بـ Intelligent Electronic Devices IEDs ، واستخدامها فى وقاية مختلف عناصر منظومة التوزيع كما فى الشكل 22-7.

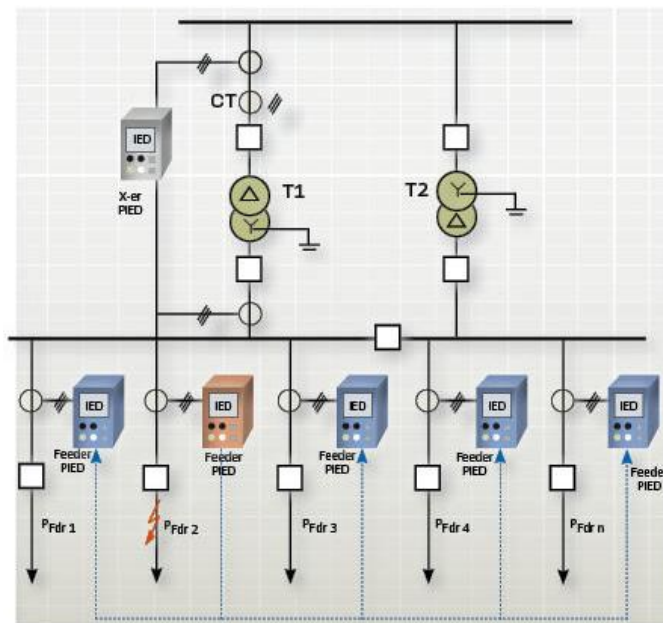


Figure 22-22 IED usage

وإلى عهد قريب كانت الشركات تنتج هذه الأجهزة بروتوكولات للتخاطب والاتصال مختلفة ، مما أدى إلى الاعتماد الكلى على الشركة المنتجة فقط في التطور أو التوسع أو الصيانة. ولذا قامت الجمعية الدولية الكهروتقنية IEC المجموعة رقم 57 بإعداد بروتوكول قياسي IEC 61850 لتنظيم إنتاج المعدات الكهربائية وتوحيد لغة التخاطب بينها بحيث يمكن تشغيل معدات مختلفة من شركات مختلفة لتعمل مع بعضها في منظومة واحدة بتوافق تام دون الحاجة إلى أجهزة أو برامج لتقوم بمهمة التوافق بينهما كما كان الحال عند ظهور هذه الأجهزة الذكية.

22.3.3 نظام الـ SCADA

كلمة SCADA ، وهي اختصار لـ Supervisory Control and Data Acquisition ، أي نظام للمراقبة والتحكم وجمع البيانات.

ويقوم مبدأ العمل فى شبكات التوزيع من خلال مراقبة الخطوط والمحولات عن طريق وجود حساسات Sensors وأنظمة تحكم طرفية Remote Terminal Unit , RTU موجودة فى لوحات التوزيع أو لوحات المحولات التى يُراد مراقبتها والتحكم بها، وتكون هذه الحساسات مُتصلة بجهاز الحاسوب المركزى، وعن طريق قنوات اتصال لنقل البيانات إلى وحدة المراقبة المركزية التى تستطيع من خلال هذه البيانات معرفة حالة الجهاز الطرفى أو الوحدة الطرفية عن بُعد دون الحاجة للمراقبة البشرية التى بدأت جميع الأنظمة فى التخلّي عنها واستبدالها بالأنظمة التكنولوجية كنظام SCADA لتوفير الجهد والوقت.

ومن خلال الحساسات والأجهزة الطرفية تستطيع أيضا بالإضافة للمراقبة أن تتحكم بالوحدات التابعة للنظام؛ كإغلاق خط أو فتحه ، أو أية عمليات تحكم عن بُعد، فمثلاً يقوم الحساس بتوجيه بيانات رقمية عبر شبكة SCADA ، وتصل إلى الجهاز المركزى بأنّ هناك ارتفاع فى درجات الحرارة لمحول معين ، فيقوم عندها العامل المناوب فى الخدمة بالتدخل إما بتخفيف الحمل أو بإرسال فرق الصيانة.

والشكل 22-8 يمثل نموذجاً لمنظومة الـ SCADA.

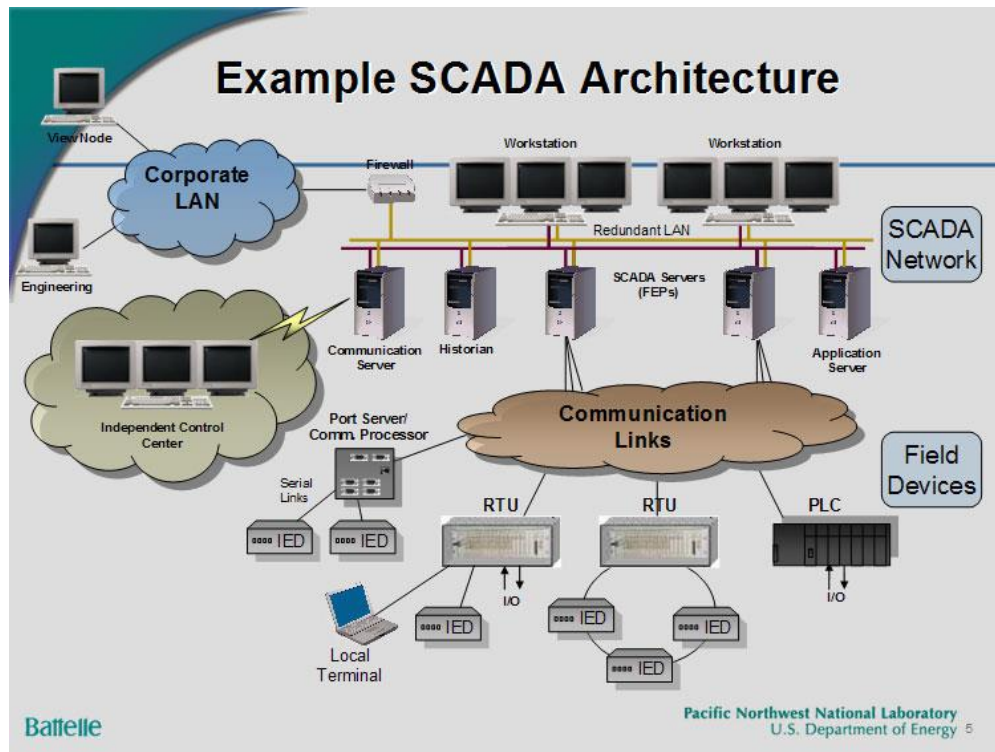
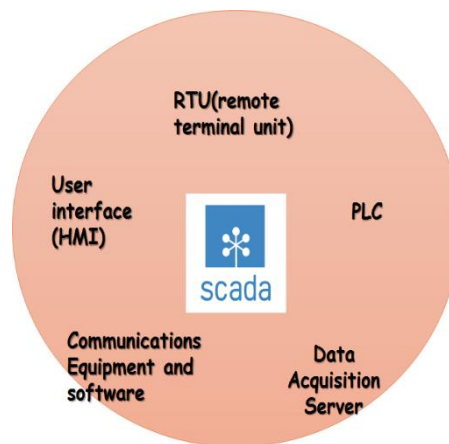


Figure 22-8 SCADA System

وغالبا ما تتكون أنظمة الـ SCADA من الأنظمة الفرعية التالية:



- 1- واجهة استخدام للمستخدم (Human-machine interface or HMI) وهي الشاشة النهائية التي تظهر عليها بيانات معالجة لمدير العمليات ، ومن خلال هذه البيانات المعالجة يقوم مدير العمليات بالمراقبة والتحكم في العمليات.
- 2- نظام المراقبة العمومي: عن طريق الحاسوب، الذي يقوم بتجميع البيانات عن الشبكة ويقوم بإرسال أوامر للتحكم فيها أيضا.
- 3- قناة الاتصال communication وهو يربط وحدات التحكم الطرفية بنظام المراقبة العمومي.

4- وحدات التحكم الطرفية (Remote terminal Unit RTU) ، وهي أداة تحكم ومراقبة عن بعد تقوم بجمع المعلومات من جميع الوحدات في المناطق الخارجية من إنذارات وقياسات والتي تكون مربوطة بالحساسات المستخدمة مثلاً لقياس درجة الحرارة، أو مستوي سائل، أو ضغط مثلاً. وتقوم وحدات التحكم الطرفية بتحويل البيانات الخارجة من الحساسات إلى بيانات رقمية، وإرسالها إلى نظام المراقبة العمومي ، بمعنى أنها تقوم بتحويل الإشارات المتبادلة مع مركز توزيع الأحمال Load Dispatch Center, LDC إلى لغة تفهمها مكونات الشبكة الكهربائية ، كذلك تقوم هذه الوحدة بجمع المعلومات من (إنذارات وأوضاع وقياسات وغيرها) من المحطات ونقلها إلى الـ Load Dispatch Center على شكل رقمي ، ثم في المركز يتم استقبالها وتحليلها واتخاذ الإجراء المناسب لكل على حدة

ووحدة التحكم عند بعد (RTU) كجهاز تتكون من: Electronics Unit ، ومصدر للطاقة Power Supply ، ووحدة I/O Peripherals . والشكل 22-9 يظهر صورة الـ RTU الموجودة بلوحة أحد محولات التوزيع.

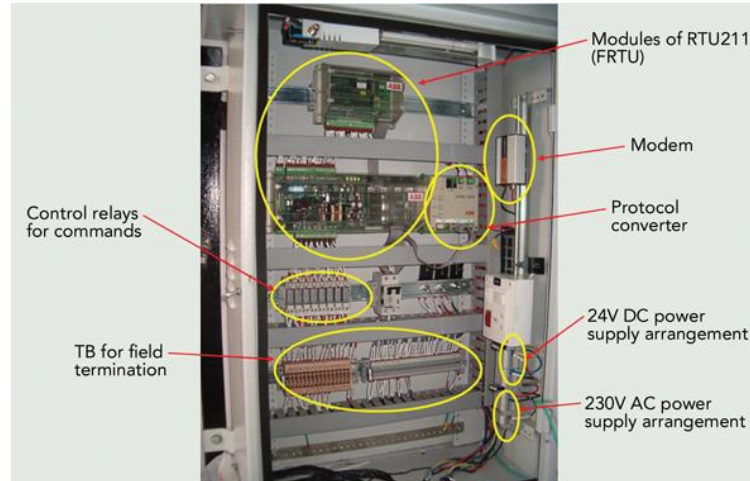


Figure 22-9 Transformer control

و تحتوي الـ (RTU) على جهاز GPS وذلك لتحديث الوقت والتاريخ في الجهاز بصورة مستمرة ، لأن الوقت والتاريخ أساسيين في عمل وحدة التحكم عن بعد ، فإرسال أي معلومة من قبل الوحدة لابد وأن تكون مرفقة بالوقت والتاريخ ومكان حدوثها وذلك لعمل التحليل المناسب لها في المركز بالسرعة والدقة المطلوبة واتخاذ الإجراء الصحيح حيالها.

وتنقسم البيانات و المعلومات التي يتعامل معها (RTU) إلى :

1- الإنذارات (Alarms)

2- الأوضاع (Status)

3- القراءات و القياسات (Measurements):

4- الأوامر (Commands) :

وهي الأوامر التي تصدر من مركز توزيع الأحمال إلى المحطات من فتح وقفل وغيرها ، والتي يتم من خلالها التحكم عن بعد في المهمات فيمكن للمهندس في مركز التحكم فصل وتوصيل المهمات .
وفيما يلي تفاصيل أكثر عن الإشارات التي يتم تجميعها بواسطة الـ RTU والتي يتم نقلها بواسطة منظومة الاتصالات المناسبة إلى مركز التحكم .

ملحوظة:

من هذه المقدمة يمكن التفرقة بين Distribution Control System, DCS وبين الـ SCADA ، فالـ SCADA تعتبر أحد مكونات نظام الـ DCS الذي يمكنه التحكم في شبكة مدينة كاملة ، بينما الـ SCADA تظهر عليها البيانات الخاصة بهذه الشبكة أو جزء منها لتساعد في التحكم.

22.3.4 الإشارات المنقولة إلى مركز التحكم من لوحات التوزيع

- بيان فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط
- بيان فصل و توصيل حالة سكين الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح (داخل أو خارج الخلية) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان بإشارة فصل جهاز الوقاية الاتجاهى لمغذيات الدخول
- بيان بإشارة فقد الجهد المستمر (D.C) لجميع المغذيات
- بيان بقيمة تيار الحمل لجميع المغذيات
- بيان بقيمة جهد (11 ك.ف) على الباسبار
- بيان بالإنذارات الآتية :-
- عطل بشاحن الـ RTU - عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
- عطل بشاحن اللوحة الرئيسية - عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
- بيان بفقد جهد الـ 220 فولت - بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
- بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU - بيان بحدوث حريق باللوحة
- بيان بحالة مفتاح الـ RTU (Local / Remote)
- بيان بحالة فتح و غلق باب اللوحة الرئيسى

22.3.5 إشارات منقولة من محطات المحولات

- بيان فصل و توصيل حالة القاطع لجميع المغذيات الدخول و الخروج و الربط
- بيان فصل و توصيل حالة سكينة الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج
- بيان حالة وضع المفتاح (داخل أو خارج الخلية) لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز زيادة التيار لجميع المغذيات
- بيان بإشارة فصل جهاز ضد التسرب الأرضى لمغذيات الدخول و الخروج .
- بيان بإشارة فصل جهاز طرح الحمل لمغذيات الخروج
- بيان بإشارة فصل غياب الجهد المستمر (D.C) لجميع المغذيات
- بيان بقيمة تيار الحمل لجميع المغذيات
- بيان بقيمة جهد (11 ك.ف) على الباسبار

بيان بالإنذارات الآتية:-

- - عطل بشاحن الـ RTU - عطل بانخفاض جهد بطارية الـ RTU
- - عطل بشاحن اللوحة الرئيسية - عطل بانخفاض جهد بطارية اللوحة
- - فقد جهد الـ 220 فولت - بيان بفقد الاتصال من الـ RTU
- - بيان بحالة فتح و غلق باب الـ RTU
- - بيان بحالة مفتاح الـ RTU (Local / Remote) .

22.3.6 إشارات منقولة من محولات التوزيع

- بيان فصل و توصيل سكاكين الجهد المتوسط لمغذيات الدخول و الخروج و المحول .
- بيان حالة جهاز مبین الاعطال .
- بيان بفقد جهد الـ 220 للـ RTU.
- بيان بفقد جهد التيار المستمر .
- بيان بفقد الاتصال من الكشك إلى اللوحة .
- بيان بقيم تيارات الحمل على الجهد المنخفض .
- بيان بقيمة جهد اللوحة على الجهد المنخفض .

22.3.7 أدوار التحكم فى شبكات الجهد المتوسط:

يمكن الاستفادة من الإشارات المنقولة من محطات المحولات والموزعات ولوحات التوزيع والتي ذكرناها فى الجزء السابق فى عمل مهام رائعة فى التحكم فى شبكات التوزيع.

وفيما يلى بعضا من المهام (المكاسب) الرئيسية بعد إنشاء مراكز التحكم فى شبكات الجهد المتوسط.

- 1- مراقبة الجهد لحظة بلحظة وتحديد أى تغيير فى حالة الشبكة فور حدوثه وهذا سوف يؤدي إلى سرعة التدخل لإصلاح الوضع وإعادةه إلى الوضع الطبيعي وتقليل فترات الفصل
- 2- المراقبة المستمرة لأحمال المغذيات والتأكد دائما أنها لم تتعدى الحدود المقننة لها وهذا سوف يؤدي إلى عدم تحميل مكونات الشبكة بأكثر من قدرتها مما يؤدي إلى الحفاظ على سلامتها وزيادة عمرها التشغيلي
- 3- نقل إشارات الأعطال وتحديد مكان العطل وذلك سيؤدي إلى تقليل زمن الفصل وعزل العطل
- 4- التحكم فى فصل وتوصيل المغذيات بالموزعات وعمل المناورات
- 5- تقدير فصل الحمل :وهي تسمى أيضا بإدارة أحمال العميل وتشمل التحكم المباشر فى مناطق أحمال العميل الفردية بواسطة موقع مركزي عن بعد (Remote Central Location)
- 6- سقوط الحمل Load Shedding :تسمح بالإسقاط السريع للأحمال الكبيرة تحت ظروف معينة وفقا لأساس الأولوية
- 7- تنظيم الجهد Voltage Regulation :تسمح بالتحكم عن بعد فى منظمات الجهد المحددة ضمن شبكة التوزيع . مع ملحوظة أن محولات التوزيع التى تحتوى على off load tap changer لا يمكن التحكم فى جهدها عن بعد.
- 8- Capacitor control ، تسمح بالتحكم عن بعد بفصل مكثفات التوزيع .
- 9- عمل دراسات الأحمال وتشمل جمع وتسجيل بيانات الأحمال ، وهذه البيانات تخزن فى نقطة تجميع بمحطة فرعية أو ترسل إلى مركز الارسل وبذلك تقدم معلومات دقيقة و وقتية للتخطيط و الهندسة فى نظم القوى الكهربائية
- 10- اكتشاف العطل والموقع والعزل :أجهزة الاستشعار الموجودة فى شبكات التوزيع يمكن استخدامها فى الكشف والابلاغ عن أى ظروف غير طبيعية وهذه المعلومات يمكن استخدامها فى تحديد أماكن الأعطال تلقائيا وعزل مكان العطل وإعادة تشكيل الدائرة الكهربائية وبذلك تساعد فريق إصلاح الأعطال فى الوصول إلى مكان العطل سريعا وكذلك تقصير مده فصل التيار عن العميل
- 11- متابعة دوائر التيار المستمر المسؤولة عن تغذية دوائر الكنترول وأجهزة الوقاية واكتشاف العطل بها بسرعة.
- 12- عند تزويد الأكشاك الكهربائية بمفاتيح ميكنة يتم اكتشاف مكان العطل وعزله أوتوماتيكيا وإعادة التغذية من الجهة الأخرى .
- 13- سهولة عمل دراسات للوقوف على حالة الشبكة فى الأوضاع العادية والغير عادية والأوضاع الحرجة لمعاونة مهندسي التشغيل على اتخاذ القرارات السليمة لتحسين ورفع أداء الشبكة واستقرارها مثل:
 - تحديد المكان الأمثل لفتح حلقات التغذية بهدف تحسين الجهد وتقليل الفقد .
 - دراسة مستوى القصر .
 - دراسة تخطيط الشبكات.
 - التنبؤ بأحمال المغذيات.
 - حسابات الفقد فى الطاقة.
- 14- التكامل مع العديد من برامج الحاسبات الآلية مثل نظام المعلومات الجغرافي الذي يتيح الحصول على صورة فورية لحالة أي مغذي، وبيان حالة الأجزاء المفصولة، والأجزاء التي تحت الجهد، موقعة على خريطة جغرافية حتى يمكن توجيه فرق إصلاح الأعطال لموقع العطل مباشرة.

ويراعى عند تصميم النظام تبني نظام الازدواجية Redundant System بحيث يكون لكل جهاز رئيسي بالمركز جهاز آخر احتياطي يقوم بالعمل آليا وبنفس الكفاءة في حالة حدوث أي خلل بالجهاز الرئيسي ، كما أن جميع أجهزة الحاسبات والطابعات متصلة ببعضها البعض عن طريق شبكة حاسبات مزدوجة LAN مما يوفر أعلى مستوى من الاعتمادية Reliability.

22.3.8 ثانيا التحكم فى شبكة الجهد المنخفض:

وتتم هذه العملية عن طريق العداد الذكى Smart Meter المركب عند المشترك سواء كان سكنى أو صناعى : وهو عداد مزود بمجموعة من الريليات الموزعة على الأحمال المختلفة فى المنزل مثلا ويتم التحكم فى كل ريلاي على حدة لتقليل الحمل عند المشترك فى حالة وجود عجز فى التوليد وتستخدم فى :

- 1- التوصيل والفصل : تسمح بالتحكم عن بعد فى توصيل أو فصل الخدمة الكهربائية عن العميل من موقع التحكم المركزى
- 2- تسعير أحمال الذروة : فهى تسمح بتنفيذ برامج تسعير أحمال الذروة باستخدام التحول عن بعد فى عداد السجلات Remote switching of meter register automatically
- 3- قراءة سجلات عداد العميل تلقائيا : تسمح بالتحكم عن بعد فى قراءة عدادات العملاء من حيث الاستهلاك الكلى و ذروة الطلب و وقتها فى اليوم و تحفظ القراءات الضرورية فى العدادات ومن ثم يتم مقارنة القياسات المقاسة من الموزعات والقياسات المقاسة من عدادات المشتركين ومقارنتهم ببعض لمعرفة وجود أو عدم وجود سرقات كهربية.

22.3.9 SCADA فى شبكات التوزيع بمصر

فى كثير من شركات التوزيع بمصر تم إدخال نظام scada وإدخال جميع البيانات الخاصة بشبكات الجهد المتوسط والمنخفض. على سبيل المثال تم تجميع البيانات الخاصة بكل كشك من أكشاك محولات الجهد المنخفض ، وهى:

- قدرة المحول المركب داخل الكشك.
- عدد الخطوط الخارجة (السورتيهات) وأسمائها
- اسم الموزع الذى يتغذى منه الكشك.
- اسم المنطقة المتواجد بها.
- عدد الأعمدة المركبة على كل سورتيه
- رقم كل عمود من بداية السورتيه.

- اسم الشارع المتواجد به كل عمود من الأعمدة
 - أسماء المشتركين على كل كشك ، وأسماء وعناوين المشتركين على كل سورتية.
- ومن خلال تجميع البيانات الجغرافية السابقة تم عمل قاعدة بيانات كاملة .

22.4 منظومة الاتصالات في شبكات التوزيع : Communications

تعتبر الاتصالات وسيط لنقل المعلومات والبيانات بين المحطات المختلفة وبين الـ Load Dispatch Center, LDC ، لذلك نلاحظ أن أجهزة الاتصالات جزء منها يوضع في المحطات والجزء الآخر يوضع في مركز توزيع الأحمال . والشكل 22-10 يلخص هذه المنظومة.

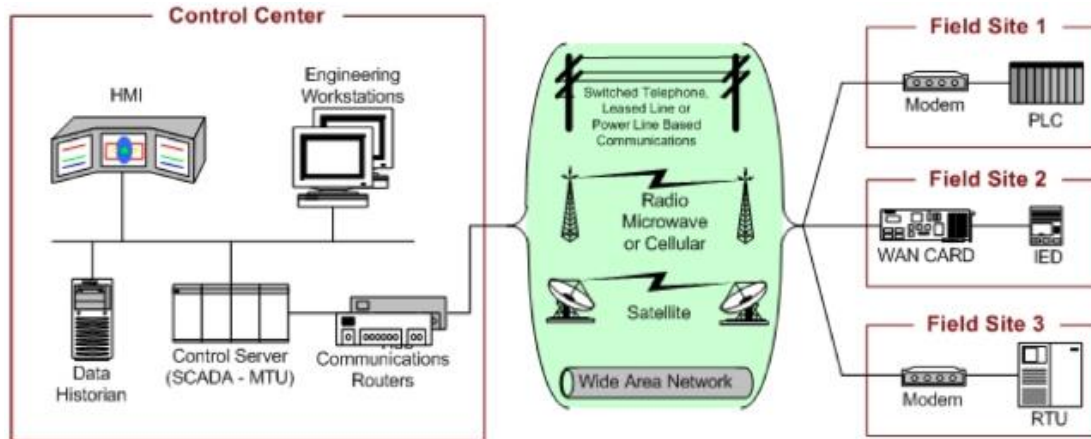


Figure 22-10

وقد سبق الحديث في الفصل الأخير من الباب الثالث عن وسائط نقل المعلومات فيمكن الرجوع إليها.

22.4.1 شبكة الاتصالات في الجهد المتوسط

ويتم عبر هذه الشبكة نقل البيانات من المواقع المختلفة إلى مركز التحكم وفي العادة يفضل أن تكون هذه الوسائل خاصة بشركات الكهرباء و عدم الاعتماد على شبكات أخرى ملك الغير ما أمكن. والوسائل المستخدمة هي:

أولاً: بين الأكشاك و لوحات التوزيع:

يتم نقل البيانات والإشارات عن طريق الـ DLC (Distribution Line Carrier) من خلال كابلات الجهد المتوسط وذلك

- إما باستخدام أرضى الكابلات (Shield)
- أو باستخدام احد أوجه الكابلات (Phase)

ثانياً: بين محطات المحولات و لوحات التوزيع ومركز التحكم:

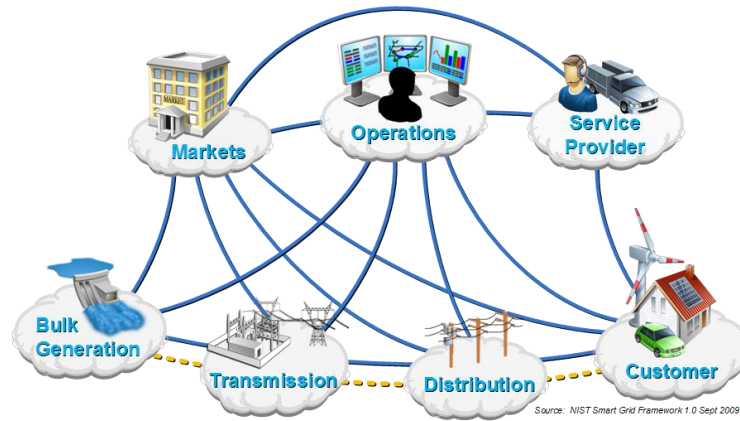
يتم نقل البيانات والإشارات من محطات المحولات و لوحات التوزيع إلى مركز التحكم عن طريق شبكة اللاسلكي (Radio Frequency) على الحيز الترددي العالي VHF .

22.5 شبكات التوزيع الذكية

الشبكات الذكية لنقل وتوزيع واستهلاك الطاقة الكهربائية تعتمد بشكل كبير على تحقيق الاستغلال الأمثل للكهرباء نقلاً وتوزيعاً واستهلاكاً .

والشبكة الذكية Smart grid هي الشبكة الكهربائية التي تُستخدم فيها تقنيات الاتصالات كالعدادات الذكية Smart Meters أو أنظمة المراقبة (SCADA) وغيرها. وذلك لجمع معلومات من نقاط استهلاك و توليد و نقل الكهرباء ومن ثم تعديل عمل الشبكة بناء على هذه المعلومات.

وكمثال لتميز الشبكات الذكية ، فقد كانت مثلاً الطريقة التقليدية للاستجابة لذروة الطلب هي في زيادة الإنتاج. أما الآن، فعن طريق الشبكة الكهربائية الذكية، تستطيع البرمجيات التنبؤ والتحكم بالطلب وقت الذروة عن طريق تفاعل المستهلك مع السعر وكذلك فهم سلوكياته. لذلك يعتقد بأن الطريقة الأكثر فاعلية في المستقبل لتقليل الأحمال سوف تكون عن طريق تغيير سلوك الفرد بالتواصل الفعال معهم من خلال الشبكات الذكية.



22.5.1 مكونات الشبكة الذكية

يمكن تقسيم عناصر الشبكة الكهربائية الذكية إلى ثلاثة أقسام:

1. الأول : يضم أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات
2. الثاني : يشمل البرمجيات الذكية.
3. الثالث : ويشمل شبكة الاتصالات وأنظمة التخزين

أولاً : أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات

تتنقسم أجهزة القياس وأنظمة إدارة المعلومات عموماً إلى قسمين:

1. القسم الأول يعنى بخطوط الضغط العالي ويشتمل مثلاً على وحدات قياس الطور PMU ، ونظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة WAM.

a. وحدات قياس الطور Phase Measuring Unit, PMU

يعد جهاز الـ PMU من أهم الأجهزة المتطورة في منظومة شبكة النقل الكهربائية. وهو نظام مطور لجهاز قياس فرق الجهد في الشبكة التقليدية مع بعض الفروقات الجوهرية. فبينما كان يقاس فقط فرق الجهد في الشبكة التقليدية ، فإن الجهاز المطور يمكنه أيضاً قياس الـ phase shift . هذا التطور الملاحظ جاء نتيجة لسببين : الأول قدرة الجهاز المطور على إجراء قياسات بنسبة تصل إلى 60 قراءة في الثانية ، بينما الجهاز التقليدي لا تتعدى قدرته 4 قراءات بالثانية. والثانى ارتباط هذا الجهاز بالأقمار الصناعية لتحقيق القياس المتزامن بين مجموعة من أجهزة قياس الطور المتصلة تحت بنية نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة.

b. نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة Wide Area Monitoring, WAM

يُعرف نظام الرصد لشبكة الاتصال الممتدة WAM بأنه بنية إدارة وتحليل المعلومات المتزامنة القادمة من أجهزة قياس الطور الموجودة في أماكن مختلفة من الشبكة والمتصلة عبر الأقمار الصناعية. ويعمل كنظام إنذار مبكر عند وجود اضطراب في الشبكة قد يؤدي إلى القفل التام لها Blackout.

2. والقسم الثانى من أقسام أجهزة القياس يعنى بالمستهلك والتوزيع كالحساسات الذكية Sensors ، والعدادات الذكية Smart Meters والأجهزة المنزلية الذكية وغير ذلك.

i. الحساسات الذكية Sensors

وهي أجهزة لقياس كمية الكهرباء المستهلكة، وأرسالها إلى منظومة القياس المتقدمة بغرض تحليل المعلومات وعمل الفواتير وبعثها إلى المستهلك بغرض الإحاطة وإمكانية تعديل السلوك الاستهلاكي. كذلك من وظائفها إخطار المستهلك بالسعر الديناميكي وإيصال معلومات إلى الأجهزة المنزلية الذكية لغرض تعظيم فائدة المستهلك الاقتصادية. فهي أجهزة ثنائية الاتصال، حيث يتم الاتصال عن طريقها بالمستهلك بواسطة شبكة الإنترنت المنزلية وتصل المعلومات للمستهلك في جهاز الحاسب أو الهواتف الذكية التي يستطيع من خلالها التحكم في نمط عمل هذه الأجهزة المنزلية. و يعول عليها أيضاً في استشعار المشكلات الخطيرة التي قد تطرأ في مكونات الشبكة حيث تقوم بتحديد أماكنها بدقة ليتم علاجها وتلافيتها في الوقت المناسب قبل أن تؤثر على أداء الشبكة برمتها.

ii. العدادات الذكية للتحكم في الاستهلاك smart meters :

وهي العدادات التي يمكن التحكم من خلالها عن بعد من فتح وغلق الأجهزة المنزلية على نحو من شأنه المساهمة في تخفيض الأحمال وارتفاع الطلب خلال فترة الصيف، كما من شأنه أيضا أن يساعد المستهلكين على ترشيد الاستهلاك والاقتصاد في تشغيل أجهزة التكييف والثلاجات والمصابيح وأجهزة منزلية أخرى وتمكنهم من التحكم والسيطرة على تلك الأجهزة عن بعد بواسطة الهواتف الخلوية أو الحواسيب المحمولة أو المتحكمات اللوحية.

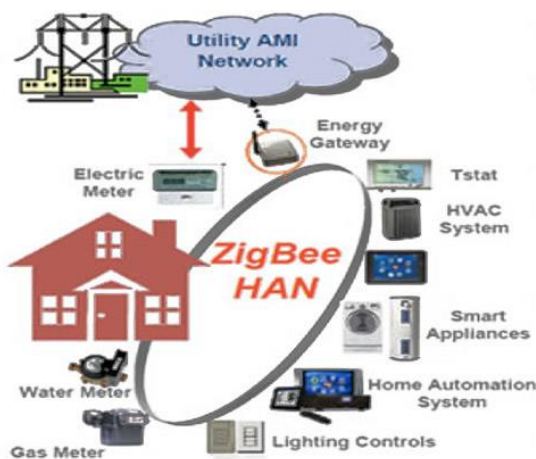


العدادات الذكية تشتمل على ميزات متقدمة مثل الدقة في القياس ، والمعايرة الرقمية السريعة، والحماية ضد العبث أو السرقة للطاقة (الاستهلاك الغير قانوني) واكتشافها اضافة إلى توفير مستلزمات التحكم بالتيار والاستهلاك والتحكم بقطع ووصل التيار سواء عن فاز واحد او اكثر او جميع الفازات معا .

ويجب أن تتكامل وتتوافق بروتوكولات ومكونات وحدات الاتصالات للعدادات الذكية مع باقي مكونات وبروتوكولات الشبكة الذكية مثل مجمعات البيانات "الكونسنتريترز" وبرمجيات التشغيل والتحكم اي ان يتكلم الجميع معا بلغة واحدة.

iii. الأجهزة المنزلية الذكية

في منظومة الشبكات الذكية سوف يكون للمستهلك الخيار لانتقاء نمط عمل الأجهزة المنزلية الذكية المرتبطة مع الشبكة الكهربائية الذكية. فلو فرضنا أن المستهلك يملك جهاز تكييف، وجهاز تسخين، وثلاجة، وغسالة ملابس،



ونشافة ، فإن الشبكة تستطيع بواسطة

الحساس الذكي التحكم في أوقات

عملها والتحكم في جهاز منظم الحرارة

المبرمج وذلك لتحقيق الموازنة بين

نمط حياة المستهلك والتشغيل

الاقتصادي، وفي نفس الوقت تجنب

التشغيل المكلف في وقت الذروة.

وبالتبع هذا يستلزم أن تتصل هذه

الأجهزة بمنظم الطاقة من خلال شبكة

WiFi ومن خلال بروتوكولات معينة تفهمها هذه الأجهزة مثل استخدام منظومة الـ ZigBee لتواصل الأجهزة معا مع جهاز الموبيل مثلا.

ثانيا : البرمجيات الذكية

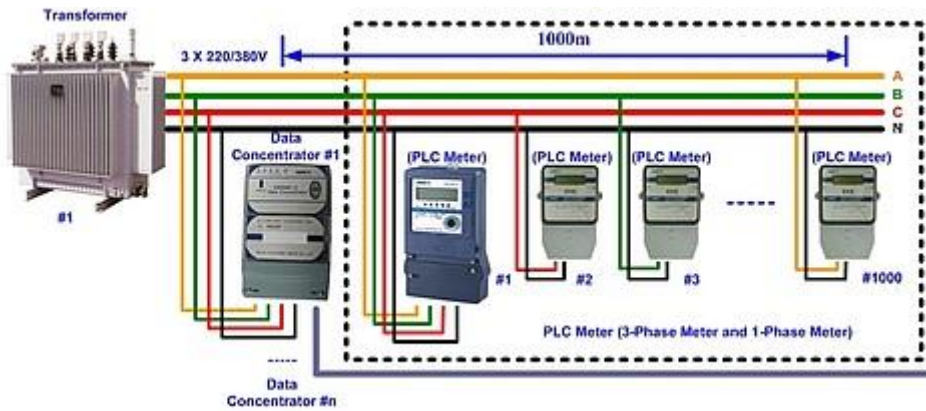
يمكن تعريف البرمجة الذكية على أنها الأنظمة البرمجية القادرة على التعامل مع مسائل معقدة، وعشوائية،

ومتغيرة البيئة. ومن المسائل المعقدة التي يجب أن تتعامل معها البرمجيات: المعالجة الذاتية Self-Healing، والطلب المتفاعل Demand Response والسعر الديناميكي Dynamic Price، والتنبؤ بقدرة مصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح على التوليد، والتعامل مع منظومة شحن السيارة الكهربائية.

ثالثا شبكة الاتصالات:

تعتبر شبكة الاتصالات من أهم مكونات الشبكة الذكية من أجل قراءة البيانات عن بعد وكذلك نقل أوامر الفصل والتوصيل، ويمكن أن يتم ذلك باستخدام خطوط الكهرباء للجهد المنخفض لدى شركات توزيع الطاقة، وباستخدام شبكة خطوط الكهرباء ذات الجهد المتوسط عند شركات نقل الطاقة والتي يجب أن تتوفر فيها الشروط والمواصفات اللازمة لنجاح نقل البيانات بكفاءة من العدادات الذكية والأجهزة الأخرى إلى مركز السيطرة والتحكم. ولتحقيق هذا الهدف فلقد اقترحت نظم اتصالات مختلفة مثل استخدام ترددات الراديو (RF)، أو الاتصال عبر خط الطاقة (PLC or BPL)، أو المنصات الهاتفية (سلكي أو لاسلكي).

وكان اقتراح استخدام البنية التحتية لشبكة الجهد المنخفض فى شبكة الاتصالات أكثر الحلول قبولاً لكونه الأقل تكلفة والأكثر أماناً ولعدم قدرة الحلول الأخرى على بناء شبكة اتصالات مستقرة واقتصادية مما حدا بالاتحاد الأوروبي سنة 2010 لتبني تكنولوجيا نقل البيانات عبر خطوط الكهرباء ذات الجهد المنخفض أو ذات الجهد المتوسط دون غيره من التقنيات الأخرى لتمييزه عن غيره ولكونه جزء من البنية التحتية المملوكة لشركات الكهرباء.



وبالإضافة للمكونات الثلاثة الأساسية السابقة فإن الشبكات الذكية تحتاج إلى:

- 1- تخزين الطاقة من المصادر المتجددة: فلا بد من وجود أنظمة تخزين ذات كفاءة عالية يمكن الركون إليها والاعتماد عليها في خفض مستويات الأحمال القصوى وتمكين المستهلك من تجنب الانقطاعات المفاجئة وخفض تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية.
- 2- التنبؤات الدقيقة لأحوال الطقس: وذلك بهدف الاستفادة القصوى من الطاقة المتجددة وزيادة موثوقية الشبكة للحيلولة دون وقوع عجز في القدرات المتاحة في محطات التوليد وعبر شبكات النقل والتوزيع.

22.5.2 وظائف الشبكة الذكية :

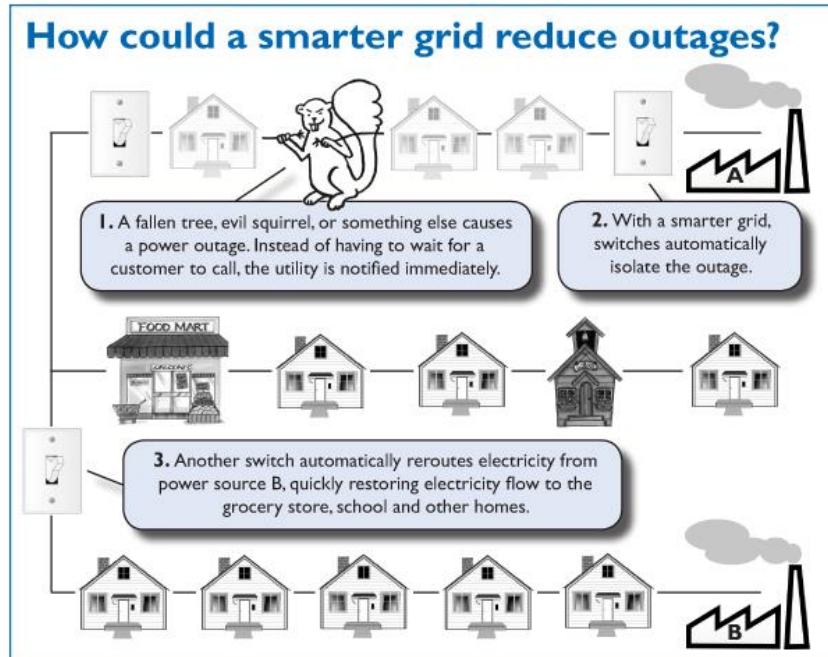
1. إدارة الطاقة المستهلكة ، وتوعية أصحاب المنازل والشركات بأن إنتاج الطاقة قد يكون مكلفاً مادياً وبيئياً في بعض الأوقات من يتطلب منهم خفض الأحمال أو تشغيلها في وقت آخر ، ويمكن القيام بذلك عن طريق مؤشرات خاصة أو من خلال متصفحات الويب أو تطبيقات الحاسب الشخصية. وذلك بتفعيل خاصية الطلب المتفاعل Demand Response الذي يُعد من أهم خصائص الشبكة الكهربائية الذكية. إذ من خلالها، يستطيع المستهلك أن يضبط استهلاكه تفاعلياً مع السعر الديناميكي، الذي يتغير كل ساعة، عن طريقين:

- a. إما أن يكبح استهلاكه طوعاً عن طريق آلية محددة سلفاً،
- b. أو عن طريق منح الشبكة الكهربائية الإجازة على التحكم في هامش محدد من الاستهلاك، كما في الأجهزة المنزلية الذكية.

2. العمل على تمكين خاصية "التوصيل والتشغيل" وهي القدرة على إضافة مصادر توليد جديدة للطاقة إلى الشبكة.

3. السماح لشركات التوليد الموزع Distributed Generation ببيع فائض الطاقة إلى المرافق العامة (تغذية الشبكة بدلاً من سحب القدرة منها).

4. تحسين التشخيص الآلي لاضطرابات الشبكة، وتقديم أفضل المساعدات للمشغلين والذين من المفترض أن يستجيبوا لمشاكل الشبكة بشكل سريع آلياً عند حدوث أخطاء في الشبكة والتي من شأنها العمل على عزل مناطق الاضطراب والمنع أو التقليل من الانقطاعات المتتالية للتيار الكهربائي نتيجة زيادة الأحمال على الشبكة والتي يمكن أن تنتشر على نطاق واسع.



22.6 ملحق أشهر برامج تمثيل ودراسة أداء الشبكات

ETAP

ETAP is a company specializing in electrical power system modeling, design, analysis, optimization, and predictive real-time solutions.

Functions include arc flash analysis, load flow analysis, short circuit analysis, motor starting, OPF, transient stability analysis, generator start-up, parameter estimation, cable sizing, transformer tap optimization, reliability assessment, transmission line constant calculations, harmonic analysis, protection coordination, dc load flow, battery discharge and sizing, earth grid design, cable pulling, and GIS map integration.

PowerWorld

PowerWorld Corporation are a Champaign, Illinois based firm that develop the PowerWorld Simulator suite of power systems analysis tools for Windows. The software focuses on a **visual** approach to power system simulation.

Functions include load flow, short circuit, contingency analysis, sensitivity calculations, security constrained OPF, transient stability, transmission line parameter calculations. Includes scripting support.

MathWorks (SimPowerSystems)

Mathworks, the makers of general purpose mathematical software MATLAB, also develop an power systems simulation program. SimPowerSystems is a tool that extends MATLAB's Simulink and provides models of many components used in power systems, including three-phase machines, electric drives, and libraries of application-specific models such as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and wind-power generation. Harmonic analysis, calculation of Total Harmonic Distortion (THD), load flow, and other key power system analyses are automated.

EasyPower

The flagship product, EasyPower, includes the following modules: arc flash analysis, power flow, short circuit, OPF, protective device

coordination, dynamic stability, transient motor starting, and harmonic analysis.

Additional workflow enhancing modules include SmartPDC™, which automates protective device coordination, and SmartDesign™ which automatically sizes feeders, breakers, switchgear, fuses, busway, MCCs, panels, etc to NEC requirements. The Scenario Manager feature allows the study of multiple system scenarios on the fly.

One line Designer is a cost effective solution for people who are dedicated to creating onelines, as well as system data collection and entry.

EMTP-RV

The ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) was first developed by Prof. Hermann Dommel in the 60s/70s for the analysis of electromagnetic transients. It was commercialized in 1987 and released as DCG EMTP and later EMTP96. [EMTP-RV](#) is the latest commercial released of the program, created by [Jean Mahseredjian](#) and currently being developed by [POWERSYS](#).

ATP-EMTP

The [Alternative Transients Program \(ATP\)](#) is a free (closed source) program for the digital simulation of electromagnetic (and electromechanical) transient phenomena. ATP-EMTP was first developed in 1984.

ASPEN

[ASPEN](#) (Advanced Systems for Power Engineering) are a California based company that develops the following separate Windows platform products:

- OneLiner - short circuit and relay coordination program (and the Breaker Rating Module add-on checks the rating of circuit breakers against the short circuit currents they need to interrupt)
- DistriView - integrated suite of voltage drop, short circuit, relay coordination, and harmonics and reliability calculation software for utility distribution systems
- Power Flow Program - power flow program designed for the planning, design and operating studies of transmission,

sub-transmission and distribution networks (includes a BASIC-style scripting language)

- Line Constants Program - calculates electrical parameters of overhead transmission lines and underground cables
- Relay Database - a repository of relay information for electric utilities and industrial facilities
- Line Database - an electronic depository of data related to power lines and cables

رَبَابٌ وَنَحَاسٌ

كابلات القوى الكهربائية

مقدمة عامة للباب

الكابلات الكهربائية هي إحدى الوسائل التي تستخدم لنقل الطاقة الكهربائية وتوزيعها في المدن والمناطق المزدحمة بالسكان ، حيث يصعب مد الخطوط الهوائية. وتتميز الكابلات بسهولة و سرعة إنشاء خطوطها مقارنة بالخطوط الهوائية. كما أنها تشغل حيز أقل من الأرض ولها عمر افتراضي أطول ، بالإضافة إلى سهولة تغيير مسار الكابل عند الدفن إلى زاوية معينة حسب سمك الكابل.

لكن من عيوب الكابلات صعوبة تحديد العطل مباشرة و صعوبة الوصول إليها في حالة الصيانة ، كما أنها تحتاج لشدة عزل عالية ، وبالتالي فهي أعلى في التكلفة من الخطوط الهوائية. كما أن استخدام الخطوط الهوائية أكثر اقتصادية من الكابلات ، حيث تصل تكلفة خطوط الكابلات من 10 إلى 20 مرة تكلفة الخطوط الهوائية ، والسبب في ذلك أن موصلات الخطوط الهوائية مكشوفة بدون عازل ، أما الكابلات فهي مغطاة بأكملها بمادة عازلة . إلا أن هذا الرقم قد انخفض كثيراً بعد الكثير من البحوث والتطوير. وهناك مقارنة تفصيلية أكبر بين النظامين في مقدمة الباب الثاني من هذا الكتاب.

الكابل عموماً يتكون من جزئين : الموصل و العازل ، ولا تختلف مساحة الموصل الحاملة لنفس التيار سواء كانت الكابلات جهد منخفض أو متوسط أو عالي حيث أن مساحة الموصل تعتمد فقط على مقدار التيار الكهربائي الذي يتم نقله أما سمك العازل فيعتمد على فرق الجهد الكهربائي على الكابل و هنا يظهر الفرق في أحجام الكابلات حيث كلما زاد الجهد زادت مساحة العزل ، فإن زاد الجهد على الكابل فإن العزل ينكسر بمعنى أنه يفقد قدرته على عزل الكهرباء و بالتالي يكون هناك خطر على جميع الأجهزة و على البشر قبل كل شيء .

تصنيف الكابلات

تصنف الكابلات تبعاً للجهد : جهد منخفض (حتى 1 ك ف) وجهد متوسط (من 1 حتى 33 ك ف) وجهد عالي (بدءاً من 66 ك ف) . وهناك فرق كبير بين كابلات الجهد المنخفض والكابلات الأخرى في عدد الطبقات بالكابل ونوعية العزل ، لكن ليس هناك فرق كبير بين كابلات الجهد المتوسط والعالي ، والفرق بينهما ليس في عدد الطبقات وإنما في خواص المواد المستخدمة في كل جهد منهما (المتوسط والعالي).

وتصنف الكابلات أيضاً تبعاً لنوع العزل فهي إما PVC أو XLPE أو هما معاً ، وقد يستخدم ورق مشبع بالزيت . علماً بأن الورق المشبع بالزيت أعلى شدة في العزل الكهربائي و أطول في عمره الافتراضي بالمقارنة بجميع العوازل الأخرى المستعملة ، لكن يعيبه أن ليس له مقاومة للرطوبة وأنه غير مرن .



وتصنف الكابلات أيضا حسب عدد القلوب ، فالكابلات إما أن تكون مفردة القلب Single Core أو متعددة القلب Multi-Core لأربعة قلوب مثلا كما في الصورة ، وقلب الكابل عبارة عن موصل يحيط به مادة عازلة تعزله عن باقي القلوب وكذلك مكونات الكابل .



وفي حالة الكابل Multicore يكون قطره الخارجى كبير جدًا فى المقاطع الكبيرة وبالتالي يصعب نقله والتعامل معه ، لذلك يتم فى هذه الحالة استخدام كابلات Single Core. وأهم عيوب هذا النوع (أحادي القلب) تتمثل فى أن التسليح بالصلب يتسبب فى حدوث فقد فى الطاقة Loss فى طبقة التغليف بسبب الـ Induced currents بما يساوي أو يزيد عن الفقد فى موصل الكابل نفسه Copper Losses لذلك يتم تسليحه بمادة غير موصلة .

ويمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات Multicore يؤدي إلى خفض التكاليف ، أما الكابلات الـ Single Core فهي أكثر مرونة وأسهل فى التركيب والتوصيل.

موضوعات الباب

مهندس القوى الكهربائية لابد يوما من أن يتعامل مع الكابلات ، سواء كابلات الجهد المنخفض (راجع كتابى المرجع فى التركيبات الكهربائية) أو كابلات الجهد المتوسط والعالي والتي تدرس فى هذا الكتاب. وأهم المواضيع التى سنتعرض لها هنا فى هذا الكتاب حسب فصول الباب هى :

1. الفصل الأول من الباب (الفصل 23) :
- a. المواد المعدنية المستخدمة فى صناعة الكابلات
- b. المواد العازلة المستخدمة فى صناعة الكابلات
2. الفصل الثانى (الفصل 24) : تركيب كابلات الجهد العالي
3. الفصل الثالث (الفصل 25) : الخواص الكهربائية للكابلات
4. الفصل الرابع (الفصل 26) : اختبارات الكابلات
5. الفصل الخامس (الفصل 27) : اكتشاف أعطال الكابلات



23

المواد المستخدمة في صناعة الكابلات

23.1 المواد المعدنية المستخدمة في صناعة الموصلات

أشهر الموصلات المستخدمة في الكابلات هي النحاس والألومنيوم. ويعتبر النحاس أكثر الأنواع شهرة في الاستخدام كموصل كهربائي لعدة أسباب منها: أنه الأفضل توصيلاً للكهرباء (مقاومة أقل) . وهو معدن له قوة احتمال كبيرة للإجهادات الميكانيكية و يمكن تشكيله. لكن عيب النحاس الرئيسي هو ارتفاع ثمنه.

أما الألومنيوم فيتميز برخص ثمنه وخفة وزنه وسهولة السحب والتشكيل على الحار والبارد. ويمكن اعتبار أن تحمل كابل ذي موصل ألومنيوم لشدة التيار يساوي 70% إلى 80% من مثيله النحاسي ، مع ملاحظة أن الانخفاض في السعر أكبر من هذه النسبة ، وهذا ما يجعل الألومنيوم أكثر إغراء في الاستخدام. ويشترط تبعا لمعظم المواصفات ألا تقل نسبة نقاوة الألومنيوم المستخدم عن 99% . والجدول 1-23 يعطي بعض أوجه المقارنات بين الاثنين.

مقارنة بين الألومنيوم والنحاس Table 23-1

CHARACTERISTICS	COPPER	ALUMINUM
Tensile strength for same conductivity	55000	40000
Weight for same conductivity (lb).	100	48
Cross section for same conductivity	100	160
Specific resistance	10	17
Cost	Relatively high	Relatively low

وأهم العيوب الأساسية في موصلات الألومنيوم هو تكون طبقة رقيقة وصلبة من أكسيد الألومنيوم الرديء التوصيل للكهرباء على سطح الموصل ، وهذا يسبب مشكلة في نقاط التوصيل لذا يلزم التأكد عند عمل توصيلات مع كابلات الألومنيوم أن يكون مكان التوصيل لامعا وغير مؤكسد ، ويفضل وضع مانع التأكسد على الموصل .

وحاولت بعض الشركات الجمع بين ميزات الاثنين فأنتجت موصلات عبارة عن قلب من الألومنيوم محاط بطبقة سميكة من النحاس الملتصق بالألومنيوم وسمكها من 10 % إلى 27 % من الوزن الكلي للكابل .وتسمى موصلات الألومنيوم الملبسة بالنحاس . Copper-Clad-Aluminum Conductors, ACAC

وأحد أهداف التلبس النحاسي Copper Clad هو التغلب على المشاكل الناجمة عند وصلات مع الألومنيوم ، فمعلوم أنه لا يصح ربط موصل ألومنيوم مباشرة على BB نحاس بسبب اختلاف الجهد الجلفاني بينهما ، ومن ثم يحدث تآكل للموصل الأسبق في الترتيب خلال الزمن وهو في هذه الحالة النحاس أى أن قضبان التوزيع ستأكل مع الوقت .



Figure 23-1 Pi metal glands

وهناك حل آخر لهذه المشكلة وهو استخدام Pi-metal glands وهي تستخدم فقط عند ربط كابلات الألومنيوم مع قضبان النحاس كما في الشكل 1-23.

23.1.1 ثانيا المواد المعدنية المستخدمة للحماية

وهناك عنصر معدني آخر مرتبط بالكابلات وهو المعدن المحيط خارجيا بالكابل من أجل توفير حماية ميكانيكية له مثل الحديد المجلفن ، لأن عملية الجلفنة تعطي الكابل قدرة عالية ضد التآكل ، ولذلك أصبح الحارس الخارجي الأول للكابل إما أشرطة الحديد المجلفن أو أسلاك الحديد المجلفن كما سيأتى بالتفصيل في الجزء الخاص بتركيب الكابل.

وهناك مواد معدنية أخرى مستخدمة في الـ Metallic sheath مثل الألومنيوم أو الرصاص كما سيأتى تفصيلا.

23.2 المواد العازلة المستخدمة في صناعة الكابلات

المواد العازلة أنواع : فمنها ما هو عنصر مثل الغازات الخاملة ، ومنها ما هو مركبات سواء كانت مركبات عضوية أو غير عضوية. و أغلب المواد المستخدمة في الواقع وهي مركبات ، لاسيما المركبات العضوية مثل الـ PVC .

23.2.1 ما معنى عازل كهربائي؟

كلمة "عازل كهربائي" تترجم إما إلى : dielectric ، وفي هذه الحالة نقصد به المادة التي يمر فيها المجال الكهربائي. مثل المادة العازلة بين الأقطاب المعدنية في المكثف مثلاً. وقد تترجم إلى "insulator" ، وفي هذه الحالة نقصد به المادة التي تستخدم لمنع مرور التيار الكهربائي عبره. وبسبب المسافات الكبيرة بين الذرات وبعضها في المادة العازلة والارتباط الشديد بين الإلكترونات والنواة فإنه يصعب انتقال الإلكترونات من ذرة إلى أخرى عند وجود تأثير مجال كهربائي خارجي عليها. وهذا هو العازل الكهربائي. وبسبب المجال يمكن تمثيل الذرة بقطبين كهربائيين أحدهما سالب والآخر موجب الشحنة. وتتصف المواد العازلة بأن كل ذرة فيه تتخذ شكل القطبين تحت تأثير مجال كهربائي خارجي ، ولا تنتقل الإلكترونات بين الذرات، أي لا تسمح بمرور تيار كهربائي.

وأهم ما يميز هذه المواد كونها غير موصلة ، فالإلكترونات فيها غير حرة الحركة كما هي في المعادن الموصلة ، وإنما تميل إلى وضع الاستقطاب Polarization في حال توجيه مجال كهربائي عليها ، بمعنى أن تتجه الإلكترونات إلى طرف من العازل (لتنشأ قطبا سالبا) بينما تزيد الشحنة الكهربائية الموجبة في الطرف العكسي (فتنشأ قطبا موجبا) - وهذا هو معنى استقطاب المادة Polarization .

23.2.2 أهم خصائص المادة العازلة كهربيا

أهم الخصائص التي يجب أن تتميز بها المادة لتوصف بأنها عازلة كهربيا هي:

- 1- أن تكون لها مقاومة نوعية عالية .
- 2- أن يكون لها جهد انكسار عالي .
- 3- ألا تقبل امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط بها .
- 4- لا تتفاعل مع الأحماض والقلويات الموجودة بالتربة .
- 5- أن تكون لها خاصية الصلابة و المرونة معاً .
- 6- لا تتأثر أو تتغير مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة الناتجة عن تيار الحمل العادي أو أقصى حمل أو الحرارة الناتجة عن تيار القصر .

7- لا تقبل سريان الحريق .

8- أقل فقد كهربائي ممكن أثناء التشغيل .

23.3 مقدمة عن البوليمرات

معظم العوازل الكهربائية الآن مصنوعة من البوليمرات ، فما هي البوليمرات؟
أن كلمة (بوليمر) لاتينية الأصل ، وهي مركبة من مقطعين هما : بولي poly وتعني متعدد ، و مر mer وتعني جزء أو وحدة ، لذلك polymer تعني متعدد الأجزاء أو متعدد الوحدات . ويسمى في بعض الأحيان الجزيء العملاق (macromolecule) وهو جزيء لمركب كيميائي ويتمثل بوزن جزيئي عالي (10000 إلى 10مليون) . والجزيء على شكل سلسلة حلقاتها عبارة عن جزيئات لمركب بسيط ، ترتبط مع بعضها البعض بروابط تساهمية (covalent bond) .

و البوليمر هو مركب ذو وزن جزيئي مرتفع مكون من وحدات جزيئية مكررة. قد تكون هذه المواد عضوية أو غير عضوية أو عضوية معدنية، وقد تكون طبيعية أو صناعية في أصلها . وقد عرف الإنسان البوليمرات منذ القدم واستخدم المنتجات النباتية و الحيوانية البوليمرية الطبيعية لأغراض مختلفة في حياته اليومية ، فقد استخدم الإنسان القار "pitch" و الراتنج "resin" النباتية كما عرف الصمغ "gum" و المطاط "rubber" قبل آلاف السنين.

و تضم البوليمرات الطبيعية أيضا العضوية النشا، والسيليلوز، والأحماض الأمينية، والبروتينات. والآن تعد البوليمرات العضوية ذات أهمية بالغة في حياة الإنسان إذ تدخل في الوقت الحاضر في مكونات غذائه وكسائه ومسكنه ، فهو ينتفع من النشويات والسكريات والبروتينات في الغذاء ، ويستخدم القطن والصوف والحرير وجلود الحيوانات في صنع الملابس كما يستفيد من الخشب في تشييد المسكن والأثاث ويستخدم المطاط والصمغ وغيرها من المواد البوليمرية الطبيعية التي لا تحصي في أغراض شتى.

وبالرغم من أن معظم البوليمرات الطبيعية تعتبر عضوية (أي أنها مبنية على سلسلة كربونية) ، فإنه يوجد أيضا بوليمرات غير عضوية ، وغالبا تكون سلاسلها مبنية على أصل من السيليكون. وتشمل البوليمرات الطبيعية غير العضوية الألماس، والجرافيت، والرمل، والاسبستوس، والعقيق، والميكا.

23.3.1 تطبيقات البوليمرات الصناعية Synthetic Polymer

في القرن العشرين عندما زادت الحاجة للمطاط في الحرب العالمية الثانية استطاع العلماء الألمان إنتاج المطاط الصناعي وهو يعطى نفس مواصفات المطاط الطبيعي وتقريبا نفس التركيب الكيميائي . وتعتبر البوليمرات الصناعية بولمرات بسيطة نسبيا بالمقارنة مع البولمرات الطبيعية وأقل في التكلفة.

البوليمرات الصناعية مثل المواد التي غزت الأسواق العالمية حديثاً ، ومنها المواد البلاستيكية Plastics ، والمطاط Rubber ، والجلود الصناعية Leather Synthetic ، وأقمشة النايلون Nylons ، والبولي إستر Polyesters. ومنها الثرمو بلاستيكات وهي البوليمرات الصناعية الصلبة التي تلين بارتفاع الحرارة ثم تعود لصلابتها بالتبريد دون تغير في تركيبها الكيميائي ، وغيرها . ومنها أيضاً الألياف الصناعية Fibers : وهي من أهم البوليمرات المستخدمة في الصناعة وتمتاز بمقاومة شديدة للتشوه وتحمل إطالة صغيرة حوالى (10-50%) ولها قوة شد عالية و تمتاز بضعف امتصاصها للرطوبة .

وفي الآونة الأخيرة أخذت صناعة البوليمرات تدخل حتى في عالم الإلكترونيات و بشكل كبير حتى دخلت في تصنيع مصادر الطاقة للأجهزة الإلكترونية المحمولة نظراً لخفة وزنها ولمواصفاتها الأخرى الحسنة . وقد حلت بعض البوليمرات المحضرة صناعياً في الآونة الأخيرة مكان المواد الطبيعية فأصبحنا نستخدم مواسير الـ PVC بدلاً من مواسير الحديد مثلاً وهذا ناتج عن التطور الهائل الذي حصل في الصناعات الكيماوية والقائمة على النفط ومشتقاته . وهذه تتميز بصفات ميكانيكية جيدة كما تتميز برخص الثمن وتوفرها بشكل كبير وقد تم استخدامها في صناعة الأدوات المنزلية والصناعات الحربية و المدنية كالسيارات والطائرات والغواصات والأجهزة الكهربائية.

وبالإضافة إلى المجالات السابقة تمكن العلماء من وضع آلية تمكن من الاستفادة من البوليمرات في مجال التوصيل الكهربائي وعلى وجه الخصوص في مجال تصنيع البطاريات الكهربائية والعوازل الكهربائية ، وهو ما يهمنا هنا .

و تنقسم لدائن البوليمر البلاستيكية إلى نوعين أساسيين هما:

1- اللدائن الحرارية: thermo-plastics

2- الجوامد الحرارية : thermo-sets

23.3.2 اللدائن الحرارية : البولي فينيل كلورايد PVC

اللدائن الحرارية هي أنواع من اللدائن تلين بالحرارة وتتصلد بالبرودة . ويعتبر الـ PVC من أشهر اللدائن الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات .

ويتميز الـ PVC بخواص كهربية ممتازة عند الجهود المنخفضة (لا يستخدم في غيرها) وعند درجات الحرارة المنخفضة ، إلى جانب رخص ثمنه. ومن ثم فهو دائماً الاختيار الأول في جميع أنحاء العالم في الجهود المنخفضة. لكن عازليته تتأثر بدرجة الحرارة ومن ثم لا يصلح في التطبيقات ذات الحرارة العالية ، فعند ارتفاع درجات الحرارة تكون مادة (PVC) أكثر ليونة وهذا بالطبع غير مرغوب فيه . كما أن مقاومته تكون ضعيفة في درجات الحرارة المنخفضة جداً حيث يمكن أن يحدث به تشققات .

و يتميز الـ PVC بخاصية الإطفاء الذاتي للهب فهو يشتعل عند تقريب لهب إليه لكنه ينطفئ بمجرد إبعاد اللهب ، إلا أنه ينتج غازات سامة عند اشتعاله. وأخيراً يجب أن يراعى ألا يتعرض الـ PVC إلى الانحناءات الحادة فهو ليس مثل المطاط في هذه الخاصية.

ويمكن إجمال سمات الـ PVC فيما يلي:

- 1- لها مقاومة نوعية عالية .
- 2- لها جهد انكسار منخفض فلا يستخدم إلا في تطبيقات تصل حتى 1000 فولت فقط.
- 3- لها خاصية عدم امتصاص الرطوبة من الوسط المحيط .
- 4- غير نشطة كيميائياً أى خاملة " لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات " .
- 5- تتأثر مكوناتها بارتفاع درجة الحرارة .
- 6- لها خاصية الصلابة والمرونة .
- 7- لا تتأثر بالمذيبات أو الشحوم .
- 8- لا تتأثر بالمياه .

23.3.3 الجوامد الحرارية :- Thermo-sets

وهي اللدائن التي لا تلين بالحرارة حتى درجة تحللها ، ويمكن صناعياً " تحويل " العديد من اللدائن الحرارية إلى جوامد حرارية وذلك بإجراء معالجة خاصة عليها تسمى التشابكية cross-linking. ويوجد نوعان من الجوامد الحرارية يستخدمان في صناعة الكابلات:

23.3.4 المطاط :- RUBBER

يعتبر مطاط البنيل bntyl rubber من أشهر أنواع المطاط الصناعي ، وقد تم استخدامه على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظراً لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن كما استخدم أيضاً في كابلات الجهد العالي بسبب مقاومته لغاز الأوزون الذي يتصاعد نتيجة لظاهرة الكرونا corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربائي.

23.3.5 عوازل البولي إثيلين PE ، والبولي بروبيلين PP

يوجد منها نوعان : بولي إثيلين مرتفع الكثافة HDPE والآخر منخفض الكثافة LDPE ، وخواصهما أقل من الـ PVC ولذا لا يستعملان كعوازل وإنما يستعملان كحماية خارجية للكابل. أما البولي بروبيلين فهو مادة عازلة وتصنع منه الخيوط المستخدمة في ربط قلوب الكابلات.

23.3.6 البولي إيثيلين التشابكي XLPE :-

مادة XLPE هي أشهر الجوامد الحرارية على الإطلاق المستعملة الآن في صناعة الكابلات ، كما أن مادة PVC هي أشهر اللدائن الحرارية . يتم تركيب المادة على موصل للكابل عن طريق البثق EXTRUSION عندما يكون في الحالة اللدنة عند درجة حرارة مرتفعة ثم تتعرض المادة لعدة عمليات كيميائية ينتج عنها تغيير في التركيب الجزيئي لها مما ينتج عنه مادة مرنة قاسية لا تلين بعد ذلك بارتفاع درجة الحرارة. ويستعمل XLPE كعازل في الكابلات حتى حرارة مستمرة تصل إلى 90 درجة مئوية.

وهو أكثر المواد استخداماً الآن في كابلات الجهد العالي والمتوسط ، حيث أنه مادة لا تلين بالحرارة حتى درجة حرارة إحتراقها أو تحللها ويتميز بخواص كهربية وفيزيائية وكيميائية ممتازة ، ويمكن استخدامها في درجة حرارة مستمرة للموصل حتى 90 درجة مئوية وبدرجة حرارة 250 درجة مئوية في فترات قصر الدائرة وتعتبر مقاومته ممتازة للرطوبة ولغاز الأوزون الذي يتصاعد نتيجة لظاهرة الكورونا Corona الناشئة من زيادة شدة المجال الكهربائي للعازل ، وهو مادة صلبة جداً غير قابلة للاشتعال.

23.4 أبرز مشاكل العوازل

تعانى العوازل المستخدمة في الكابلات الكهربائية من عدة مشاكل . منها:

23.4.1 المفقودات Losses

والـ Loss عموماً تسبب ارتفاع في درجة حرارة الكابل ، ومن ثم يجب التأكد دائماً من وجود اتزان حراري للكابل ، بمعنى أن الحرارة المتولدة تساوى (أو أقل من) الحرارة المتسربة من الكابل . لاحظ أن الحرارة المتسربة من الكابل تتوقف في حالة دفن الكابل تحت الأرض على المقاومة الحرارية لنوعية التربة ومسامية حبيباتها.

مفقودات القدرة خلال العازل المحيط بالموصل Insulation Loss تحسب من المعادلة التالية:

$$P_{ins} = V^2 \omega C \tan \delta$$

حيث (δ) هي زاوية الفقد Loss angle لمادة العازل المحيط بالكابل ، وهي الزاوية بين الجهد والتيار المتسرب ، وبالتالي تختلف عن زاوية الـ Power Factor التي تكون بين الجهد والتيار الـ Load . والزاوية (δ) إحدى الثوابت التي تميز مادة عازلة من أخرى ، ومن الواضح أنها كلما زادت قيمتها كلما زادت الـ Power loss خلال العازل.

23.4.2 التيارات المتسربة خلال العوازل

تعتبر ظاهرة تسرب التيار على مدى طول الكابل خلال طبقات العازل التي تحيط بموصل الكابل من المشاكل السلبية التي تظهر بوضوح في الكابلات ، ويسمى هذا التيار بتيار الشحن Charging Current أو التيار المتسرب Leakage Current . وتحسب قيمة هذا التيار من المعادلة:

$$I_C = V\omega C$$

حيث

V هو جهد التشغيل مقاسا بالـ Volt.

ω ترتبط بتردد التيار (f) المار بالكابل من خلال العلاقة ($\omega = 2\pi f$).

C هي السعة (Capacitance) مقاسة بالـ Farad .

ومن هنا ، فكلما زاد جهد التشغيل ، أو زادت الـ Capacitance الخاصة بالكابل كلما ارتفعت قيمة التيار المتسرب على طول الكابل ، حتى أنه يصل إلى 13A لكل كيلومتر طولى في الكابلات جهد 220 kV.

و عندما يصل طول الكابل إلى قيمة معينة (تسمى الطول الحرج Critical Length) فإن قيمة تيار الشحن المتسرب من الكابل تصبح مساوية لقيمة التيار المقنن للكابل I_R . وهذا يعني أن كل الـ Power المنقولة خلال الكابل قد تسربت ، و لم يصل للحمل منها شيء. والطول الحرج في منظومة الـ 132 kV هو 64 Km ، بينما يصل هذا الطول الحرج في منظومة الـ 400 KV إلى 24 Km فقط . ومن الواضح أنه كلما زاد الجهد زاد التيار المتسرب وبالتالي يقل الطول الحرج وهذا من عيوب الكابلات التي لا حل لها.

23.4.3 ظاهرة WATER TREE :



Figure 23-2 Water tree

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدي إلى نشوء ظاهرة التشجير المائي (Water Treeing) - لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم - فعندما تتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة بسبب عدم انتظام المجال الكهربائي بين الموصل والمادة العازلة على طول الكابل بسبب وجود نتوءات كأحد صور عيوب التصنيع ، ينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربائي عند نقاط النتوءات وقتله عند الجزء الأملس من الكابل. و هذا الاختلاف يتسبب في وجود شقوق في العزل تتفرع في جميع الاتجاهات مثل الشجر (شكل 23-2) . ويعتبر تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات أحد أهم أسباب انهيار العزل.

تركيب الكابل

تتشابه كل الكابلات في أنها تحتوي على موصلات لحمل التيار ، وعازل محيط بالموصلات ، ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكابل. وهذا هو المشترك بين كابلات الجهد المنخفض وكابلات الجهد المتوسط والعالي ، لكن كابلات الجهد المتوسط والعالي تزيد عن هذا التركيب البسيط بعدة طبقات أخرى لعلاج مشاكل الجهود العالية وعدم تماثل توزيع الجهد كما سنرى.

وسنركز هنا على تركيب كابلات الجهد العالي (سنستخدم هذا المصطلح للتعبير عن كابلات الجهد المتوسط والعالي لأن الفرق بينهما ليس في عدد الطبقات وإنما في خواص المواد المستخدمة في كل طبقة) وخاصة كابلات XLPE وهي الأكثر انتشارا في الشبكات الآن بعد ضالة فرص استخدام الورق المشبع بالزيت والذي كان قديما هو الأكثر انتشارا.

23.5 تركيب كابلات الجهد العالي :

داخل كابلات الجهد العالي والمتوسط توجد عدة طبقات (شكل 24-1) ، كما يلي:

1. الموصل .
 2. حجاب الموصل الأول (شبه الموصل) Semiconductor Layer .
 3. العزل Insulation
 4. حجاب العزل (شبه الموصل الثاني) Semiconductor Layer .
 5. حجاب العزل الثاني (الشبكة النحاسية) أو Metallic Sheath
 6. الحشو (أو الفرشة) Filling .
 7. شنبر التسليح إن وجد Armoring .
 8. عزل داخلي (بلاستيك)
 9. الغلاف الخارجى Outer Sheath .
- وسنعرض بالتفصيل لمواصفات كل طبقة واستخداماتها.

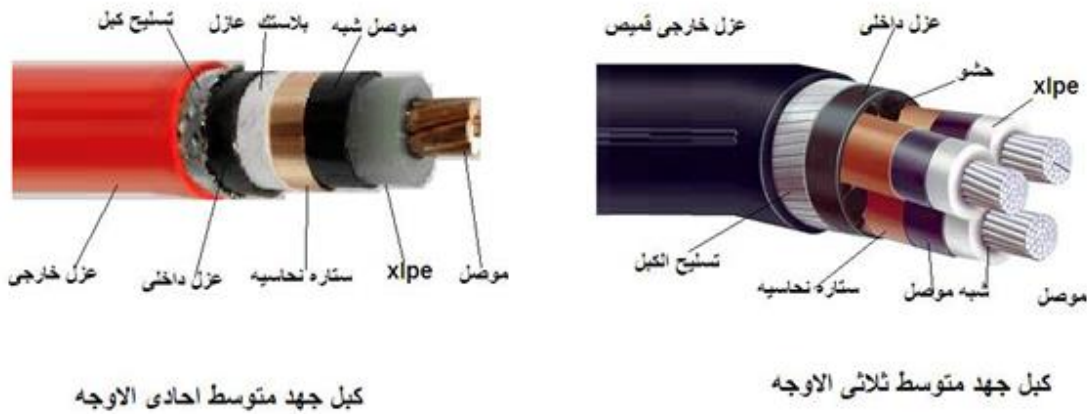


Figure 23-3 الطبقات المختلفة في كابلات الجهد العالي

23.5.1 الموصل Conductor

يعتمد اختيار السلك الموصل على عدة سمات منها مقدار التيار الذي يمر فيه Ampacity ، والجهد والخواص الفيزيائية والمرونة Flexibility ، وبالطبع الناحية الاقتصادية.

والموصلات عادة تصنع من أسلاك مجدولة stranded كما سبق أن ذكرنا عند الحديث عن موصلات الخطوط الهوائية في الباب الثاني (يفضل الرجوع إليها الآن لمراجعة سمات الأسلاك المجدولة وسمات المواد المستخدمة في صناعة الموصلات عموماً سواء النحاس أو الألومنيوم بأنواعه). وأحياناً تضاف طبقة من القصدير على الموصل فتسمى أسلاك مقصدرة Tinned wires وأهمية هذه الطبقة هي منع تفاعل النحاس مع بعض مكونات العوازل المطاطية.

ومقاس الموصل Size يقدر بمساحة مقطعه ، والذي يقدر عادة بالملم المربع بالمعايير الدولية أو يقاس بوحدة American Wire Gauge, AWG حسب المقاييس الأمريكية . والمساحة هي مجموع مساحة الشعيرات المستخدمة. والجدول التالي يعطي معلومات عن العلاقة بين نظامي القياس والذين يجب أن يحيط بهما أي مهندس .

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

لاحظ في النظام الأمريكي أنه كلما كبر الرقم كلما صغرت مساحة المقطع كما في الشكل.



وقد سبق الحديث عن المواد المستخدمة في صناعة الموصلات. ويتبقى فقط الحديث عن مقاومة الموصل وهي موجودة في الفصل التالي عند الحديث عن المواصفات الكهربائية للكابلات.

23.5.2 حجاب الموصل (طبقة شبه الموصل) Semiconductor Layer

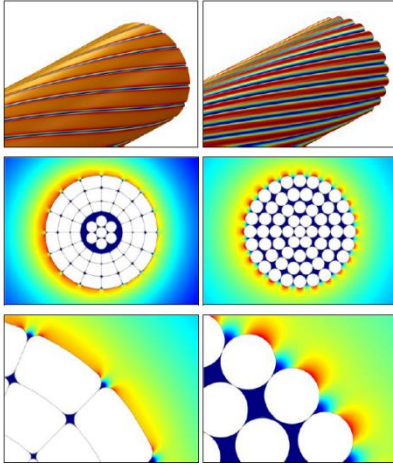


Figure 23-4 تأثير عملية الجدل على توزيع شدة المجال

تتسبب عملية جدل الأسلاك للحصول على موصل الكابل في زيادة شدة المجال الكهربائي على سطح الموصل بنسبة تصل إلى 20% ، فالجدل غير مستقيم يؤدي إلى عدم انتظام المجال الكهربائي في السطح الداخلي بين العازل و الموصل و الذي ينتج عنه ارتفاع / انخفاض قيم المجال في بعض النقاط كما في الشكل 24-2. و هذا الاختلاف قد يؤدي إلى انهيار العزل.

وهذه المشكلة قد تؤدي أيضا إلى حدوث ظاهرة الـ water tree وتسرب الرطوبة إلى داخل المادة العازلة لوجود هذه النتوءات التي تؤدي لوجود شقوق في الكابل تتفرع في جميع الاتجاهات مثل الشجر كما سبق الحديث عنه في نهاية الفصل السابق.

ولعلاج هذه المشكلة فإننا نأخذ في الاعتبار في تصنيع الكابل تركيب مادة شبه موصلة (شكل 24-3) تسمى

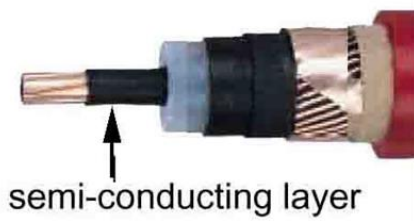


Figure 23-5

ستارة الموصل (Conductor Shield) و هي تستخدم لتقليل ظاهرة الـ stranded effect و من أجل الحصول على أفضل توزيع للمجال الكهربائي حيث أن هذه الطبقة تعمل على تنعيم سطح الموصل و جعله أملس. كما تعمل على تنظيم خطوط المجال الكهربائي لتصبح غير عمودية على سطح الموصل.

وتصنع هذه المادة من مادة البلاستيك مع إضافة كربون أسود لإعطاء الحجاب خاصية شبه التوصيل (بحيث تكون مقاومة شبه الموصل أعلى من مقاومة الموصل نفسه) ويساعد شبه الموصل هذا على انتظام المجال الكهربائي داخل العازل كما ذكرنا.

كما أن الخاصية البلاستيكية للمادة شبه الموصلة تجعلها ملائمة للتمدد والانكماش مع العازل في فترات زيادة أو قلة الأحمال على الكابل (زيادة الحمل تزيد حرارة الكابل) مما يؤدي إلى منع تكون أي فقاعات داخل الكابل بين الموصل والعازل . علما بأن وجود تلك الفقاعات مع الإجهادات الكهربائية يؤدي إلى تأين الهواء بالفقاعة وبالتالي انهيار العازل واحتراق الكابل .

23.5.3 العزل INSULATION

ويعتبر العزل أهم مكونات الكابل فإذا ضعف العزل أو انهار أصبح الكابل بلا فائدة ولا قيمة له ومن أجل ذلك فإن أهم اختبار يجري في المصنع بعد التصنيع هو اختبار العزل وكذلك أثناء فحص واستلام التركيبات وكذلك قبل إطلاق التيار في المشروعات. والعزل يقوم بعزل الفازات بعضها عن بعض ، وكذلك عزل وحماية البشر المتعاملين مع الكابل. وفي حالة كابلات الجهد العالي والمتوسط فإن العزل يكون من مادة XLPE " البولي إيثيلين المتشابك وقد سبق الحديث عن سماته في الفصل السابق .

ملحوظة:

أسماء أنواع العوازل السابقة هي الشائعة في أوروبا والشرق الأوسط ، أما في أمريكا فالعوازل مختلفة تماما في أسمائها ، فرغم أنها أيضا مواد بوليمرية إلا أن هيئة الاختبارات الأمريكية اختارت أسماء مختلفة لأنواع العوازل ، من أهمها:

- عوازل Type T : وتستخدم في الأماكن الجافة فقط
- عوازل Type TW, THW, THWN : للعوازل المستخدمة في الأماكن المعرضة للمياه
- عوازل Type TBS : وهو من اللدائن الحرارية وبه ألياف خارجية مبطن للهب ويستخدم في لوحات التوزيع.
- عوازل Type MTW : وهو مقاوم للرطوبة والحرارة والزيوت
- عوازل Type THHW : وهو نفسه الـ XLPE ويستعمل حتى 75 درجة في الأماكن الجافة وحتى 90 درجة في الأماكن الرطبة.

وأهمية هذه الملحوظة أن بعض الشركات الأمريكية العاملة في بلادنا تستخدم منتجات بلادها برموزها ، وبالتالي فالمهندسين العاملين بهذه الشركات عليهم أن يتعاملوا بأسماء هذه المنتجات.

23.5.4 حجاب العازل (شبه الموصل الثاني)

توضع مادة شبه الموصل semi - conductor في كابلات الجهد العالي والمتوسط بعد الموصل ، وتوضع أيضا بعد العزل مباشرة . ووظيفة هذه المادة هي جعل خطوط المجال الكهربائي تسير بشكل موازي للموصل (شكل 24-4) وليس في اتجاه عمودي على اتجاه الموصل وبالتالي لا يحدث إجهاد على العزل. وتصنع مادة شبه الموصل (الثاني) غالبا من مادة مطبوخة على الـ Phase أى مبثوقة وتكون صعبة النزع حتى أننا نحتاج إلى زجاجة مسطرة لنزعها عند عمل الوصلات.

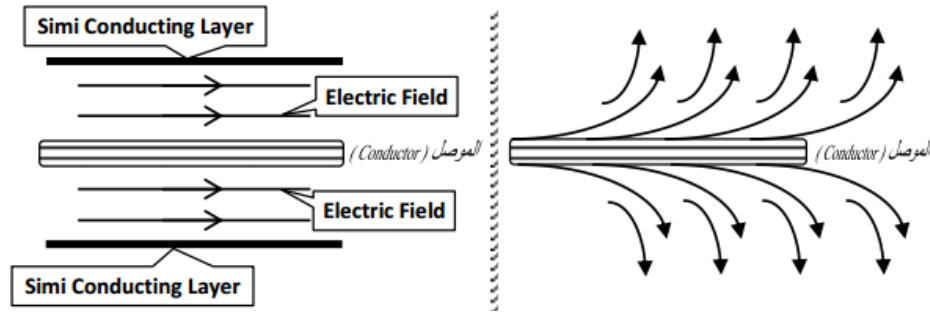


Figure 23-6 انتظام شدة المجال

يتكون حجاب العازل من جزئين هما:

- الحجاب العازل المساعد Auxiliary Shield وهي شبه الموصل الذي تحدثنا عنه آنفا
- الحجاب الأساسي Primary Shield (وهي نفسها طبقة الـ Metallic sheath التالية)

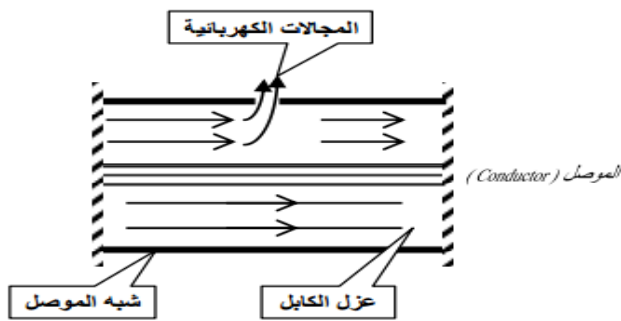


Figure 23-7 تأثير عدم اتصال شبه الموصل

لاحظ أنه إذا حدث ثقب في هذه الطبقة semi - conductor فإن ذلك يؤدي إلى تجمع خطوط المجال الكهربائي بالثقب وتكون خطوط المجال عموديا على العزل وبالتالي انهيار العزل كما في الشكل 24-5.

23.5.5 الغلاف المعدني Metallic sheath

يوجد غلافان معدنيان يسميان تسليح (شكل 24-6) بكابلات الجهد المتوسط والعالي:

- الغلاف الأول داخلي: (وهي الطبقة التي نتحدث عنها الآن) ويوضع هذا الغلاف المعدني على كل فارة

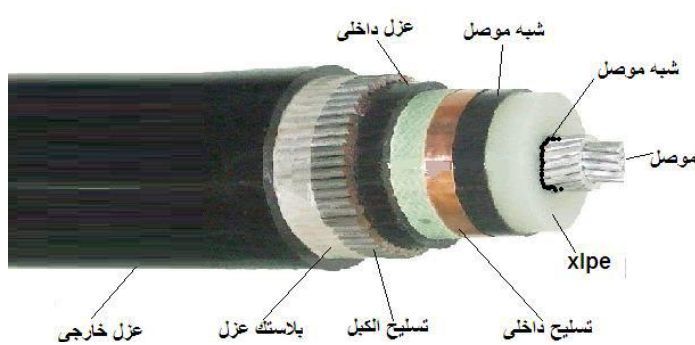


Figure 23-8 طبقات التسليح

من الفازات الثلاثة حتى يمكنها من تسريب تيار القصر - إن وجد - كما أنها تحمي الفارة من الرطوبة وتسرب المياه . وقد يصنع

من الرصاص أو الألومنيوم أو النحاس.

ويصنع الغلاف المعدني Metallic Sheath الأول بأشكال مختلفة ، منها:

- شريط/ أسلاك من النحاس يلف على العازل بطريقة لولبية .
- أو شريط معرج من النحاس يوضع على العازل بطريقة طولية.
- وقد يكون غلافا مصمما من الرصاص يتم لصقه بالطول عن طريق البثق -Extruded lead sheath حيث يتميز الرصاص بسهولة الصنع ومقاومته للتآكل إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة وغير مشع حراريا وهذا يعنى حبس الحرارة داخل الكابل لذلك يستعمل بعض سبائك الرصاص لتحسين تلك الخواص.
- كما يمكن استخدام الألومنيوم في صناعة الغلاف المعدني للكابلات نظرا لأنه أقوى من الرصاص . ولكن نظرا لارتفاع شدة معدن الألومنيوم الميكانيكية فإنه يكون من الصعب التعامل معه خصوصا عند عمليات ثني الكابل. إضافة إلى ذلك فإن الإجهادات الميكانيكية الشديدة الناتجة عن التمدد الحراري في الكابل تؤثر تأثيرا سيئا على وصلات الكابل في حالة استخدام غلاف أملس من الألومنيوم . وقد تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام غلاف ألومنيوم معرج corrugated يمكنه امتصاص وتحمل تلك الإجهادات بطريقة أفضل من الغلاف الأملس.

- والغلاف المعدني الثانى (خارجى) : وهو نفسه طبقة التسليح قبل الأخيرة التى سنتحدث عنها لاحقا.

23.5.6 مزايا الأغلفة المعدنية عامة

- 1- حصر المجال الكهربى داخل الكابل. ويعبر عن ذلك بمصطلح "تحجيب الكابل " أى عمل حجاب للكابل لمنع خروج المجالات الكهربائية والمغناطيسية خارجه.
- 2- توفير مسار لتيار القصر الأرضي.
- 3- خفض الإجهادات الكهربائية على العازل وخاصة المجالات العمودية على سطح العازل التي تتسبب في تلفه.
- 4- الحد من التشويش على أجهزة الاتصالات بسبب تحجيب المجالات.
- 5- خفض مخاطر الصدمات الكهربائية في حالة التأريض الجيد للكابل.
- 6- يوفر حماية ميكانيكية وكيميائية وطبيعية لمادة العازل .

23.5.7 الحشو أو (الفرشة) FILLING - BEDDING :

يوضع حشو بين الفازات وهى عبارة عن فرشة أو مخدة لكل فازة . وعادة ما يتم تصنيع هذا الجزء من مادة PVC لما لها من مميزات ذكرناها من قبل . و فائدة طبقة الحشو مايلي :

- العمل على استدارة الكابل وبالتالي يسهل سحبه وتمديده.
- حماية الفازات من شنبر التسليح الذى سيوضع لاحقا أن وجد .
- تساعد على عدم تسريب الماء والرطوبة إلى داخل الكابل
- تعمل كغطاء واقى من الصدمات الميكانيكية الخارجية
- حماية القلوب فى حالة وجود طبقات من شرائح الصلب

23.5.8 التسليح (التدريع) ARMOUR :

الكابلات قد تكون مسلحة وقد تكون بدون تسليح ، ولكل منهما مجالات للاستخدام ، فالكابل المسلح يستخدم فى الحالات التالية:

- الأرض الهشة ذات التراب أو الرمل الناعم .
- الأرض المعرضة باستمرار لمرور السيارات والمشاه والمركبات (ضغوط ميكانيكية)

والكابلات المسلحة تتمتع بحماية ميكانيكية ضد الإجهادات التي يتعرض لها أثناء عمليات النقل والتركيب أو إذا كانت عرضة للوقوع تحت أحمال كبيرة كمرور السيارات وخلافه. ومن فوائد هذه الطبقة أيضا المساهمة فى إيجاد مسار لمرور تيار العطل Earth Faults وتوفير مسار رجوع له إلى مصدره بدلا من الرجوع فى الأرض.

والغلاف المعدنى الخارجى يصنع من الصلب حتى لا يصدأ ويأخذ أشكالا مختلفة حسب الصور التالية:

- قد يستعمل طبقتان من شرائط الصلب بسمك يتراوح من 0.5 – 0.8 mm حسب قطر الكابل . وتدهن هذه الشرائط بالبيتومين.



أسلاك التسليح Figure 23-9

- كما توجد طريقة أخرى لعملية التسليح الكابل ، وهى استخدام أسلاك من الصلب المجلفن كما بالشكل 7-24. ويمكن القول أن عملية تسليح الكابل هي خبرة فنية خاصة بكل دولة أو شركة تقوم بتصنيع الكابلات .

23.5.9 المشاكل المرتبطة بالغلاف Sheath Effect

عند مرور تيار في موصل الكابل ذي القلب الواحد فإن هذا التيار يولد حوله مجالا مغناطيسيا عبارة عن مسارات مغلقة من الفيض المغناطيسي تولد Induced EMF في غلاف الكابل نفسه وكذلك في أغلفة الكابلات المجاورة له ، هذه القوة الدافعة الكهربائية تسبب تيارات تأثيرية ينتج عنها مفقودات الغلاف التي منها :

1- مفقودات بسبب التيارات الدوامية في الغلاف

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) والتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار .

ففي الشكل 24-8 عند مرور تيار في موصل الكابل (ب) يتولد مجال مغناطيسي يقطع غلاف الكابل (أ)

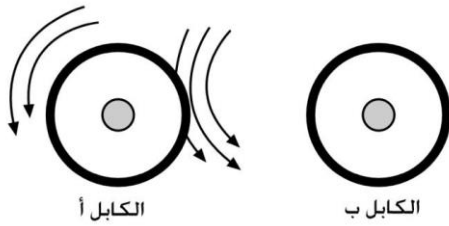


Figure 23-10

المجاور له بحيث تكون شدة هذا المجال في الجهة القريبة من الكابل (ب) أكبر من شدته في الجهة البعيدة عنه. ويتولد عن ذلك فرق في الجهد بين مقطعي غلاف الكابل (أ) وينشأ عنه تيارات دوامية (لاحظ أن التيارات الدوامية تسير عرضيا في الكابل وليس طوليا كما يظن البعض ومن هنا سميت دوامية لأنها تشبه الموجات الصغيرة في النهر التي تتحرك عمودية على اتجاه النهر).

وينشأ عن هذه التيارات مفقودات في الغلاف تمثل حوالى 2% بالنسبة لمفقودات الموصل ويظهر تأثيرها في الكابلات ذات الأغلفة المعدنية.

2- تقليل المفقودات في الغلاف عن طريق عمل Cross Bonding

تستخدم طريقة الترابط المتقاطع للأغلفة Cross Bonding في الأنظمة ثلاثية الطور المكونة من ثلاثة كابلات أحادية الطور لمنع مرور التيارات المستحثة في أغلفة الكابلات ، فغالبا تربط أغلفة الفازات الثلاثة ذات القلب الواحد ربطا متقاطعا Cross Bonded بمعنى أن



Figure 23-11 Cross Bonding box

يوصل غلاف الفاز الأول بغلاف الفاز الثاني والثالث كما يربط غلاف الفاز الثاني بغلاف الفاز الثالث كما في الشكل 24-9 ، فهذا يمنع تيارات الغلاف نظرا لأن جهود الأغلفة الثلاثة مزاحة عن بعضها بزاوية 120 درجة وبالتالي يصبح مجموع الجهد على الغلاف يساوى صفرا .

ويتم عمل الـ Cross Bonding عند صناديق التوصيل (Link Boxes).

وعملياً يتم التأكد من تنفيذ هذا التصميم على الوجه المطلوب أثناء اختبارات الاستلام وذلك بحقن تيار على الموصل في حدود 100 أمبير ومن ثم قياس التيار المار بكل غلاف فلا بد ألا يزيد عن 3 أمبير أي 3% من تيار الموصل (التفاصيل لاحقاً).

هذا التوضيح مبني على فرض أن الكابلات الثلاثة موضوعة في شكل مثلث متساوي الأضلاع Trefoil أما إذا وضعت الكابلات على مستوي أفقي في خط مستقيم Flat فإن مفقودات الكابل لن تكون متساوية في الكابلات الثلاثة وستنشأ كمية من الفقد ولذلك نقوم بعملية التبديل لمواضع الكابلات (Transposition) للعمل على تقليل الـ Induced voltage في الكابلات وبالتالي تقلل الفقد (لاحظ ترتيب الكابلات الثلاثة المفردة وكيف تم عكس هذا الترتيب مرتين في شكل 10-24 على طول الكابل).

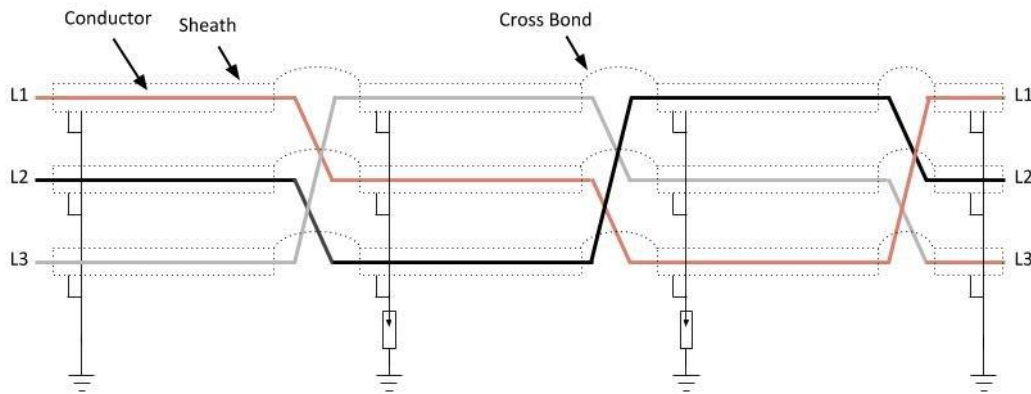


Figure 23-12 عملية التبديل في الكابلات الأحادية

3- تأريض الغلاف المعدني للكابلات

يجب تأريض الكابل المسلح في الكابلات الـ Single phase وذلك للتخلص من الجهد الناشئ على هذا الغلاف بسبب المجال المغناطيسي الناتج عن مرور التيار في الموصل كما ذكرنا. ويكون التأريض بإحدى طريقتين : إما تأريض الغلاف من جهة واحدة أو من جهتين.

- فأما التأريض من جهتين فهو الأفضل للكابل حيث لا يوجد خطر على العازل أو الأشخاص العاملين في صيانة تلك الكابلات فالجهد يكاد يكون صفراً على الغلاف. ولكن المشكلة في هذه الطريقة هي مرور تيارات في الغلاف بسبب أن الدائرة مغلقة ومن ثم يكون لدينا Losses تتناسب مع مربع التيار المار في الغلاف .

- أما الطريقة الثانية فهي تأريض الغلاف من جهة واحدة ، وفي هذه الحالة تكون الدائرة مفتوحة وبالتالي لا يوجد Losses ، ولكن المشكلة هنا هي ارتفاع الجهد على الطرف الآخر من الكابل إلى قيمة قد

تتسبب في حرق عازل الكابل ولذلك يوضع Sheath Voltage Limiter كما في الشكل 11-24 عند الطرف الآخر من الكابل وتعمل عند قيم معينة تضبط عندها لتفريغ هذا الجهد. والشكل 11-24 يظهر عملية التأريض مع عملية الـ Transposition .

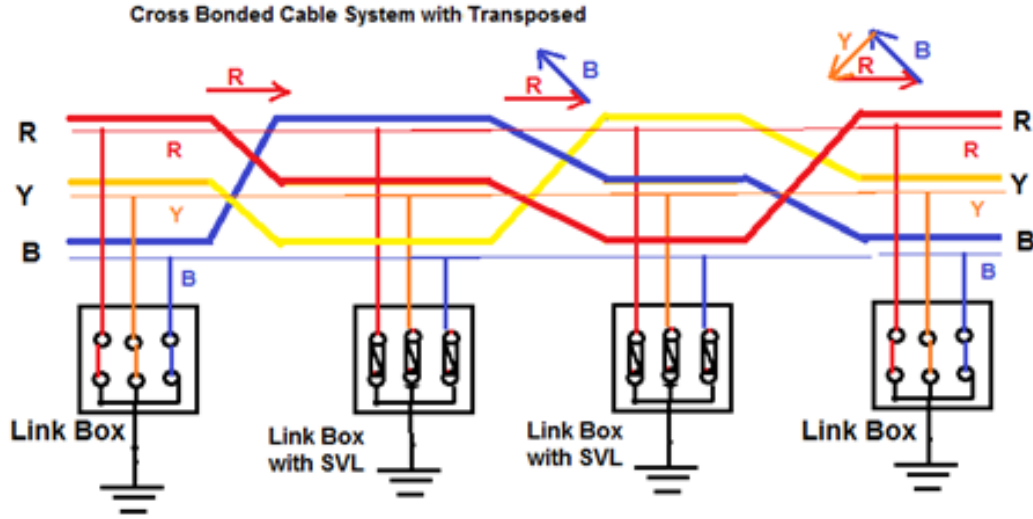


Figure 23-13 التباديل في الكابلات الثلاثية

ملحوظة هامة :

يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية في تغليف الكابلات الـ Single Core لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون .

23.5.10 الغلاف الخارجى Outer Sheath:

الحماية الخارجية للكابل عبارة عن طبقة من مادة لها خواص معينة . توضع فوق الغلاف أو فوق طبقة تسليح الكابل بحيث تكون طبقة الحماية الخارجية هي آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة الخارجية والمواد الأخرى المحيطة به. والغلاف الخارجى للكابل يكون عادة من مادة خاملة كيميائيا أى لا تتفاعل مع الأحماض أو القلويات أو المواد العضوية ولذلك كانت مادة PVC (تستعمل فى هذه الطبقة مهما كان جهد التشغيل لأن دوره هنا ليس العزل الكهربى وإنما الحماية الكيميائية) هى الأكثر استخداما فى الكابلات كغلاف خارجى حماية للكابلات من التآكل فى التربة .

ويجب أن يكون غلاف الكابل مانع للهواء والماء ويغطيه بكامل طوله ، ويسمى هذا الغلاف (الجاكت) أو الغلاف الواقى. وقد يكون الغلاف الخارجى لونه أحمر أو أسود وليس للألوان دخل فى تحديد وتفضيل أى كابل عن الآخر .



Figure 23-14

23.5.11 أطراف التوصيل الخارجية



Figure 23-15 Rain Shed

أطراف التوصيل الخارجية هي تلك التوصيلات التي تستخدم عند ربط كابل مع الخط الهوائي وبالتالي يكون معرضا للظروف الجوية . ففي هذه الحالة يكون العزل مدرجا بدوائر مثل الشمسية تسمى Rain Shed لحماية العازل من الأمطار والأتربة ، كما فى الشكل 13-24 .

ويتوقف عدد الشمسيات على قيمة الجهد ، فجهد 11 ك ف يستخدم معه عدد 2 شمسية ، بينما جهد 22 ك ف يستخدم معه 3 شمسيات ، وجهد 33 ك ف يستخدم معه 4 شمسيات. والشكل 14-24 يظهر تفاصيل أكثر عن هذه التوصيلة.



Figure 23-16



24

الخواص الكهربية للكابلات

يقصد بالخواص الكهربية للكابلات دراسة العناصر التالية:

- 1- مقاومة الموصل و مقاومة العازل
- 2- محاثية الكابل (Inductance)
- 3- سعة الكابل (capacitance)
- 4- بالإضافة إلى دراسة المجال الكهربي والمغناطيسي للكابل.

24.1 مقاومة الموصل Conductor Resistance

ويرمز لها بالرمز R ، وتختلف المقاومة من مادة إلى أخرى ، وتتوقف قيمتها على مساحة مقطع السلك وطوله ومقاومته النوعية ، ووحدة قياس المقاومة هي الأوم.

ومقاومة الموصل للتيار المتردد تختلف عن مقاومته للتيار الثابت لنفس المادة . ويرجع ذلك إلى سببين أساسيين هما:

1. الظاهرة القشرية Skin effect حيث يميل التيار إلى المرور داخل الموصل في الطبقة الخارجية منه تاركاً وسط الموصل ، وذلك بسبب توزيع الفيض المغناطيسي للتيار داخل الموصل نفسه كما سبق شرحه في الباب الثاني عند الحديث عن الموصلات في الخطوط الهوائية .

2. الظاهرة التجاورية Proximity effect وتنشأ هذه الظاهرة عند وجود كابلين متجاورين يقع كل منهما في المجال المغناطيسي للآخر .

وتسبب الظاهرتان السابقتان زيادة في مقاومة الموصل للتيار المتردد عن مقاومته للتيار المستمر .

24.1.1 مقاومة العزل Insulation resistance

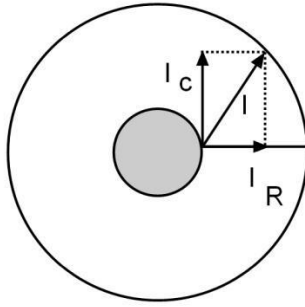


Figure 24-1

نظرا لعدم وجود مادة عازل كاملة ($R = \infty$) فإنه بمجرد تعرض الكابل للجهد يتولد فرق جهد بين الكابل وغلافه (حتى وإن كان الكابل غير محمل أي بدون مرور تيار في موصل الكابل) وبسبب هذا الفرق في الجهد يمر تيار متسرب في عزل الكابل الذي يمكن اعتباره مكثفا غير نموذجي أي أنه مكثف بالتوازي مع مقاومة ، ولذا سيتسرب تيار I_c في اتجاه عمودي على اتجاه المجال إلى الغلاف كما هو موضح بالشكل 1-25 نتيجة سعة الكابل ويتسرب تيار آخر I_R نتيجة لمقاومة العزل. وتعرف الزاوية δ بين التيار المحصل I وبين التيار I_c بزاوية فقد العازل ويجب أن تكون أصغر ما يمكن (تكون صفرا إذا كان العزل نموذجيا أي ليس لديه تيار متسرب في المقاومة الأومية R (المقاومة الأومية تعتبر مالا نهائية في العزل النموذجي) حتى يمكن تقليل الفقد في العازل لذا يتم اختيار العازل بحيث تكون مقاومته كبيرة جدا .

إذن مقاومة عزل الكابل هي المقاومة لمرور التيار في الاتجاه القطري بين الموصل والغلاف. ويمكن الحصول على قيمة مقاومة العزل للكابلات من المعادلة الآتية:

$$R_{ms} = \frac{\rho}{2l\pi} \ln(R/r_0) \quad \text{ohm}$$

حيث

$$\begin{aligned} \rho &= \text{مقاومية مادة العزل (ohm.m).} \\ l &= \text{طول الكابل (m).} \\ R &= \text{نصف القطر الخارجي للكابل.} \\ r_0 &= \text{نصف قطر الموصل.} \end{aligned}$$

ويوجد مزيد من التفاصيل حول مقاومة العزل في الفصل الرابع من هذا الباب والخاص بالاختبارات حيث يمكن مراجعة المجموعة الخاصة باختبارات العزل.

24.2 محاث الكابلات Cable Inductance

يمكن استخدام نفس طرق حساب الـ Inductance للخطوط الهوائية في الكابلات الأرضية ، ولكن سيكون هناك أخطاء في النتائج وذلك بسبب تأثير الظاهرة السطحية والتقارب Skin and Proximity Effects وتأثير وجود الغلاف . ففي الكابلات منخفضة الجهد تكون المسافة بين الموصلات صغيرة بالمقارنة بأقطار الموصلات وعلى ذلك لا يمكن إهمال التأثيرات السابقة.

وعلى ذلك فمن الأفضل قياس الـ Inductance عند الاحتياج إليها لأن الحسابات تكون صعبة وغير دقيقة.

أما في كابلات الجهد العالي فيتم إهمال تأثير الظاهرة السطحية والتقارب بسبب ازدياد سمك العازل وفي مثل هذه الكابلات يتم تغليف القلوب المنفصلة أو إحاطتها بورق معدني يتم توصيله بالغلاف

والأغلفة المعدنية تتشأ Mutual Inductance بين الموصلات وتؤثر بطريقة ملحوظة على المعاوقة الكلية ، وفي هذه الحالة يتم الأخذ في الاعتبار التأثيرات الناتجة عن الغلاف المعدني .

تعتمد Inductance لموصلات الكابلات في النظم ثلاثية الطور على الشكل الهندسي لهذه الموصلات (شكل 2-25).

$$L = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \text{ mH/km}$$

$$L_1 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{12}D_{31}}{r D_{23}} \right)$$

$$L_2 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{23}D_{12}}{r D_{31}} \right)$$

$$L_3 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_{31}D_{23}}{r D_{12}} \right)$$

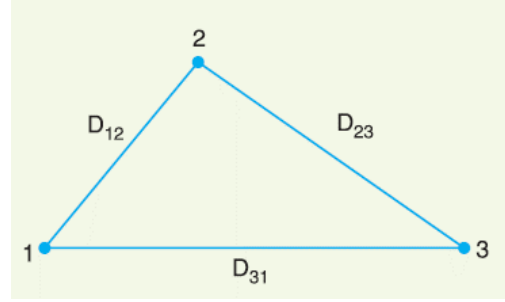


Figure 24-2

والقيمة المتوسطة للـ Inductance هي:

$$L_m = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D_m}{r} \right) \text{ mH/km}$$

حيث D_m = متوسط البعد الهندسي المتبادل للبعد بين مركز الموصلات.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \text{ mH/km}$$

وبرغم أنه يمكن حساب الـ Reactance (ωL) باستخدام المعادلات المبينة أعلاه إلا أن قيم هذه الـ Inductance المدرجة في جداول خصائص الكابلات التي يصدرها مصنع الكابلات هي القيم التي يتم الحصول عليها بالقياس وذلك لأن مقطع الموصلات في كثير من الكابلات ليس دائريا وأيضا لأن القيمة الفعلية للـ Inductance تعتمد على النظام المستخدم في تأريض الغلاف ونظام الترابط بين الأغلفة وبعضها وعلي ما إذا الكابل له درع أم لا.

وبصفة عامة فإن قيمة الـ Inductance الحثية للكابلات تقع في حدود 0.08-0.24 أوم/كم.

24.3 سعة الكابل Cable Capacitance

السعة الكهربائية هي مقدار الشحنة التي يحملها المكثف مقسوما على جهده ($C=q/v$)، والمكثف نظريا هو لوحين موصلين بينهما عازل ، ومن ثم يمكن اعتبار أن هناك مكثف تخيلي موجود بين موصل الكابل (القلب) والغلاف المعدني (sheath) ، وتتشتأ أيضا مكثفات بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض .

في حالة الكابل ذي القلب المنفرد أو الموصل الواحد فإن السعة C بين الموصل والغلاف الخارجي أو الحجاب الخارجي هي:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(R/r_0)} \text{ F/m}$$

حيث

$$\epsilon_0 = \text{سمحية الفراغ} (8.83 \times 10^{-12} \text{ F/m})$$

$$\epsilon_r = \text{السمحية النسبية لمادة العزل.}$$

$$r_0 = \text{نصف قطر الموصل.}$$

$$R = \text{نصف القطر الداخلي للغلاف.}$$

أما في حالة الكابلات ثلاثية القلوب فإن السعة بين قلب وآخر (C_c) ، والسعة بين القلب والأرض (C_s) ، أو بين قلوب الكابلات بعضها البعض وبينها وبين الأرض تكون كما في الشكل 25-3.

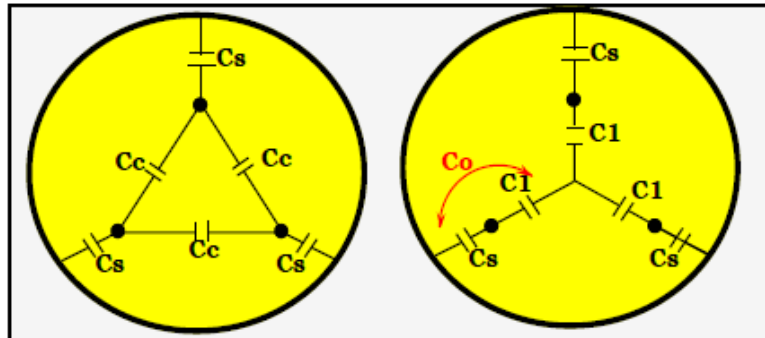


Figure 24-3

من الصعب حساب السعة لهذه الكابلات ، حيث أن اتجاه المجال الكهربائي في هذه الكابلات ليس نصف قطري، ويتم تعيين سعة الكابلات في هذه الحالة عن طريق القياس.

وجدير بالذكر أنه يمكن إيجاد قيمة تقريبية لسعة هذه الكابلات من المعادلة الآتية:

$$C = \frac{0.111\epsilon_r}{\ln \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r_0^2(27R^6 - a^6)}} \mu\text{F/m}$$

حيث

 r_0 = نصف قطر الموصل (mm). R = نصف القطر الداخلي للغلاف أو الحجاب (mm). a = المسافة بين الموصلات (mm).**24.4 المجال المغناطيسي للكابلات :**

عند مرور التيار الكهربى فى أى موصل ينتج عنه مجال مغناطيسى واتجاه هذا المجال يتحدد حسب " قاعدة فلمنج لليد اليمنى " .

ويجب الحرص على أن تكون أطوال الكابلات في المباني قصيرة قدر الإمكان لأن النقاط المجال الكهرومغناطيسي يتناسب مع طول الكابل. وبما أن أي موصل يحمل تياراً يشع حوله مجالاً مغناطيسياً فإنه يمكن أيضاً أن يلتقط مجالاً مغناطيسياً موجوداً حوله وهذا يؤثر سلباً على المعدات المجاورة ويمكن تعطيلها ويؤثر أيضاً على توصيل الطاقة المطلوبة.

وكما ذكرنا سابقاً يجب عدم استخدام أى مواد مغناطيسية فى تغليف الكابلات لأن المواد المغناطيسية يمر فيها تيارات حثية ناتجة عن قطع المجال للغلاف وبذلك ترتفع درجة حرارة الكابل . ومن هنا نلاحظ أن كابلات الجهد المتوسط من النوع الـ Single Phase تكون ذات تسليح ألومونيوم أو بدون .

والشكل 25-4 يظهر مقارنة بين قوة المجال المغناطيسي خارج الكابل فى حالات مختلفة.

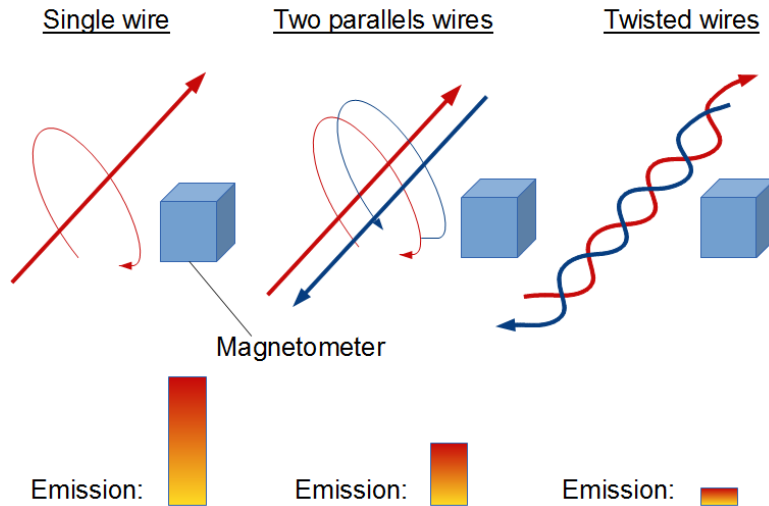


Figure 24-4 قوة المجال المغناطيسي خارج الكابل حسب طريقة اللف

24.5 المجال الكهربى للكابلات

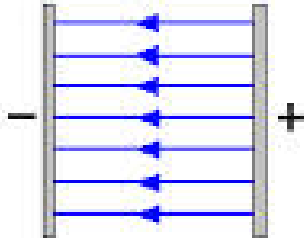


Figure 24-5

يتشابه الكابل مع المكثف فى عدة نواحى ، فالمكثف عبارة عن لوحين معدنيين بينهما عازل. كذلك الكابل فهو يحتوى على موصلات معدنية بينها عازل. وعند تغذية المكثف بتيار مستمر نجد الآتى:

اللوح الموصل بالطرف السالب : يحمل شحنة سالبة .
اللوح الموصل بالطرف الموجب: يحمل شحنة موجبة (الإلكترونات مسحوبة منه). وتتحرك الإلكترونات بواسطة قوة لها اتجاه تمثل بخطوط تسمى بخطوط "المجال الكهربى" .

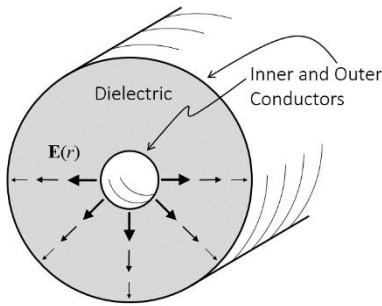


Figure 24-6

ونفس الشئ فى الكابلات أى يحدث داخله مجال كهربى إذا وصل بتيار مستمر فلدينا بالكابل موصلين (داخلى وخارجى وبينهما عازل سيظهر عليه فرق جهد وتتراكم شحنة على الكابل وكأنه مكثف مشحون شكل 25-6 .
وحتى مع التيار المتردد فإن الكابل يكون غير قادر على تفريغ هذه الشحنة حيث تكون سرعة التردد عالية جدا . وعلى هذا يكون الكابل عند تغذيته بتيار متردد كأنه مكثف.

ويعرف المجال الكهربى المنتظم بأنه المجال الذى قيمته ثابتة عند جميع النقاط ويمكن الحصول عليه من خلال صفيحتين متوازيتين مساحتهما كبيرة والمسافة بينهما صغيرة مشحونتين بنفس مقدار الشحنة لكن الأولى موجبة والثانية سالبة.

فى المجال الكهربى المنتظم تكون شدة المجال متساوية وفى نفس الاتجاه . فمثلا المجال الكهربى بين لوحين تكون شدة المجال الكهربى متساوية وتعادل :

$$\vec{E} = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

حيث:

E شدة المجال الكهربى ب فولت/متر ،

ΔV فرق الجهد بالفولت

Δx المسافة بين اللوحين بالمتر .

24.5.1 قياس شدة المجال الكهربائي Electrical field

شدة المجال عند نقطة = الجهد مقسوما على بعد تلك النقطة ، و شدة المجال تقاس بوحدة V/m ، ويعزى

الاهتمام بقياس شدة المجال إلى أنه العنصر المؤثر

على جودة العزل ، فيهما أن نعرف ما هو أقل

وأقصى شدة للمجال داخل الكابل .

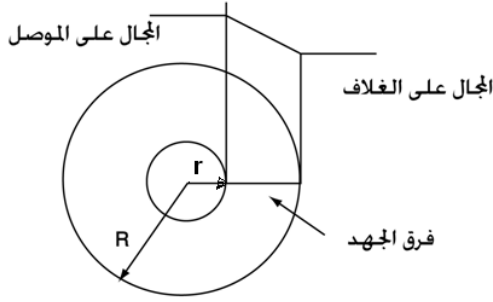


Figure 24-7

وكما هو واضح من الشكل 25-7 فإن أقصى شدة

مجال داخل لكابل يكون عند سطح الموصل و لذا

تستخدم طبقة شبه موصلة حول القلب لتنظيم المجال .

أقل شدة مجال تكون عند سطح الغلاف المعدني الداخلي كما هو موضح بالشكل وتحسب شدة المجال عند

سطح الموصل من العلاقة:

$$E = \frac{V}{X \ln \frac{R}{r}}$$

واضح من المعادلة السابقة خطورة معدل تغير الجهد بصورة مفاجئة كما هو الحال عند الحواف المدببة أو

الأطراف لأنه طبقا للمعادلة السابقة ستكون هذه الأماكن هي الأعلى في شدة المجال ، ومن ثم تكون الأخطر

على حالة العزل في هذه الأماكن .

24.5.2 تأثير المجال الكهربائي على الأطراف :

المجال الكهربائي للكابل دائما موجود حتى في حالة عدم تحميل الكابل طالما الكابل متصلا بالمصدر ، لأنه لا

يعتمد على التيار بل ينشأ نتيجة وجود فرق جهد بين الموصل الحامل للتيار والغلاف المؤرض ، وفي حالة زيادة

الجهد عن الحد الطبيعي فإن تأثير المجال الكهربائي سوف يظهر وتحدث فرقة أو شرارة أو تفريغ . و تركيز

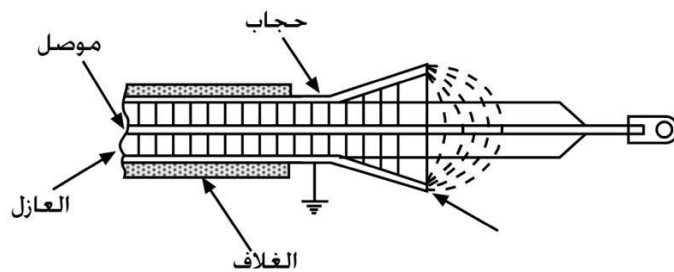
خطوط المجال في نقطة يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة في هذه النقطة وبالتالي يؤدي إلى انهيار العزل عندها .

وعند الحاجة لعمل Gland في نهاية الكابل يلزم قص جزء من حجاب العازل وحجاب الموصل ابتداء من نهاية

الكابل وذلك لجعل التوصيل سليم كهربيا ولكن قص الحجاب يؤدي إلى عدم استمرارية انتظام المجال الكهربائي،

ويصبح المجال مركزا على حافة الموصل مما قد يؤدي إلى انهيار عازل الكابل .

ويلزم عند عمل أطراف نهاية للكابل أخذ تلك القوي في الاعتبار حتى لا يحدث انهيار للكابل عند الأطراف ويتم إضافة أنبوب Stress Control Tube لتقليل تلك الإجهادات بقدر الامكان وتقليل تركيزها بجعلها موزعة على مساحة أكبر كما في الشكل 8-25 الذي يبين كيف نستخدم أنبوبة تخفيف الضغط Stress Control



Tube حيث يلاحظ انتظام وتخفيف تركيز المجال الكهربائي بعد استعمال الأنبوبة. وهناك صورة أخرى في نهاية الفصل السابق للـ Stress Control Tube .

Figure 24-8 Stress Control

ولحماية المواد العازلة عند الأطراف يجب تركيب أشربة أو حواف تركيب على العزل لتزيد من سمكه (شكل 9-25).



Figure 24-9

24.5.3 تأثير المجال الكهربائي على ظاهرة WATER TREE :

تسرب الرطوبة لداخل العازل يمكن أن يؤدي إلى نشوء ظاهرة التشجير المائي (Water Treeing) - لاسيما إذا كان سطح الموصل غير أملس والمجال غير منتظم - وينتج عن ذلك زيادة المجال الكهربائي عند نقاط النتوءات وقلته عند الجزء الأملس من الكابل. وهذا الاختلاف يتسبب في وجود شقوق في الكابل تتفرع في جميع الاتجاهات مثل الشجر و تسرب الرطوبة إلى داخل الكابلات وهي إحدى أسباب انهيار العزل. راجع الصورة الموجودة في الفصل الثالث من هذا الباب الخاص بالخصائص الكهربائية للكابل.

25

اختبارات الكابلات

تخضع الكابلات للعديد من الاختبارات بعد إنتاجها و كذلك بعد تمديدها. ويمكن تقسيم هذه الاختبارات عموماً إلى أربع فئات:

- اختبارات روتينية. Routine Tests.
- اختبارات خاصة. Special Tests.
- اختبارات نوعية. Type Tests.
- اختبارات ما بعد التركيب. Electrical Tests after Installation.

وقد قامت اللجنة الكهربائية الدولية (IEC) International Electro-technical Commission بوضع تفاصيل هذه الاختبارات لكل نوع من أنواع الكابلات وذلك طبقاً لنوع العزل المستخدم و نطاق الجهود التي تستخدم فيها هذه الكابلات. وتعطي هذه المواصفات بالتفصيل قيم جهود الاختبار والشروط اللازمة لها مثل درجة الحرارة وأنواع الجهود المستخدمة وطول ونوع العينة التي تستخدم لكل اختبار.

ويمكن الرجوع إلى تفاصيل الاختبارات لمختلف أنواع الكابلات في المواصفات التي أصدرتها IEC والتي نورد هنا وهي: 60228 و 885, 840, 502, 230, 229, 141, 55-1 IEC: وسنشير هنا سريعاً للمجموعات الثلاثة الأولى من هذه الاختبارات ، ثم يتم التركيز فقط على النوع الأخير لارتباطه الوثيق بعمل معظم المهندسين.

25.1.1 الاختبارات الروتينية:

يتم إجراء هذه الاختبارات على جميع أطوال الكابلات المصنعة وذلك للتأكد من أن هذه الكابلات تحقق المعايير المطلوبة. فعلى سبيل المثال تعتبر الاختبارات الآتية اختبارات روتينية للكابلات البولييمرية للجهود المقننة من 30 ك ف حتى 150 ك ف وذلك طبقاً للمواصفة IEC-840:

- اختبار التفريغ الجزئي (Partial Discharge).
- اختبار تحمل الجهد.
- الاختبار الكهربائي على الغلاف اللامعدني.

أما الاختبارات الروتينية بالنسبة للكابلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت فهي في مدي جهد حتى 275 ك ف طبقا للمواصفة IEC-141:

- اختبار مقاومة الموصل.
- اختبار السعة.
- اختبار معامل الفقد $\tan \delta$.
- اختبار الجهد العالي.

25.1.2 الاختبارات الخاصة (اختبارات العينة):

تُجري هذه الاختبارات على عينات من الكابلات ، وقد تكون هذه العينات بكرة كاملة من الكابل المنتج في بعض الأحيان ، أو أطوال محددة من الكابل حسب الشروط التي تحددها مواصفات الـ IEC لكل اختبار .

ومن أمثلة الاختبارات الخاصة الواجب إجراؤها على الكابلات ذات العوازل البلمرية للجهود المقننة من 30kV حتى 150kV طبقا للـ IEC 840 مايلي:

- فحص الموصل (Conductor Examination).
- قياس مقاومة الموصل.
- قياس سمك العزل والأغلفة اللامعدنية.
- قياس سمك الغلاف المعدني.
- قياس الأقطار.
- اختبار التصلد الساخن Hot St Test لكل من البولي إيثيلين المشبك XLPE ومطاط الإيثيلين بروبيلين EPR.
- قياس السعة.
- قياس الكثافة للبولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE.

أما الاختبارات الخاصة المطلوب إجراؤها على الكابلات المعزولة بالورق المشرب والمملوءة بالزيت في مدي جهد حتى 275kV وطبقا للـ IEC-141 فهي:

- تغير عامل الفقد ($\tan \delta$) مع درجة الحرارة.
- اختبار أمان العزل.
- اختبار الجهد الدفعي الساخن Hot Impulse Voltage Test.

25.1.3 الاختبارات النوعية:

يتم إجراء الاختبارات النوعية قبل أن يقوم المصنع بإنتاج نوع معين من الكابلات على المستوى التجاري وذلك لبيان أن هذا المنتج يفي على نحو مرض بمتطلبات الأداء. ولا توجد ضرورة لتكرار القيام بهذه الاختبارات ما دام الكابل قد اجتازها بنجاح إلا إذا قام المنتج بعمل تغييرات في التصميم أو المواد المستخدمة في صناعة الكابل مما قد يؤثر على أدائه. ومن أمثلة هذه الاختبارات النوعية التي يجب إجراؤها على الكابلات البلمرية للجهود المقننة من 30kV حتى 150kV (IEC 840):

- اختبار ثني يتبعه اختبار للتفريغ الجزئي.
- اختبار قياس عامل الفقد ($\tan \delta$).
- اختبار جهد مع دورة تسخين يتبعه اختبار قياس للتفريغ الجزئي.

ويتم القيام بهذه الاختبارات على عينات من كابلات لا يقل طولها عن 10 متر. وجدير بالذكر أن هذه الاختبارات النوعية يجب أن تتم بالترتيب التعاقبي المدرج أعلاه.

25.2 اختبارات الموقع للكابلات الجديدة والاختبارات أثناء الخدمة

هذه الاختبارات يتم إجراؤها عقب تركيب الكابل مباشرة للتأكد من سلامة الكابل قبل تحميله بالتيار. وكذلك تجرى هذه الاختبارات أثناء وجود الكابل بالخدمة ، فقد تحدث له أعطال أو تحدث تركيبات متصلة به أو وصلات إلخ ، ويترتب على ذلك احتياجنا إلى عمل اختبارات تساعد في التأكد من سلامة التركيبات الجديدة أو سلامة الوصلات أو تساعد في تحديد ماهية العطل ومكانه.

وأهم هذه الاختبارات هي (عدد الاختبارات ونوعها يتوقف على المواصفات المتبعة) :

1. اختبار تحديد الأوجه
2. اختبار استمرارية التوصيل
3. اختبار مقاومة الموصل
4. اختبار قياس سعة الكابل Cable Capacitance
5. اختبارات سلامة غلاف الكابل Sheath Test
6. اختبارات صناديق الـ Cross Bonding
7. اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق Earth resistance measurement of link boxes
8. اختبار قياس الممانعة الصفرية والممانعة الموجبة zero & positive impedance

9. اختبارات جودة العزل (اختبار قيمة مقاومة العزل – اختبار مدة التحمل – اختبار جهد انكسار العزل –

اختبار جودة العزل $\tan \delta$)

10. اختبار الجهد العالي (باستخدام الـ DC, AC, or Very low frequency, VLF)

والنوعان الأخيران يندرج تحتها عدد من الاختبارات كما سنرى.

وفيما يلي تفصيل لهذه الاختبارات .

25.2.1 اختبار تحديد الأوجه Phase Checking

ليس بالضرورة أن تكون الفازات في الكابلات مميزة بألوان مختلفة بل قد تكون جميعها سوداء أو حمراء ، ومن هنا تظهر أهمية هذا الاختبار للتأكد من أن ما نسميه phase-R في الناحيتين هو بالفعل الـ R-Phase . ويعتبر هذا الاختبار ضرورياً للتأكد من صحة الأوجه قبل بداية جميع الاختبارات حيث يترتب على تشغيل الدائرة في وجود خطأ في الأوجه مرور تيار قصر عالي.

ويتم تحديد الوجه بواسطة تأريضه من الجهة البعيدة وترك باقي الأوجه غير مؤرضة كما في شكل 1-26 ، فإذا كان الـ phase صحيحاً فإن جهاز الـ (Megger) يعطي قراءة مقاومة تساوى صفراً للوجه المؤرض ثم يعطي قيمة عالية إذا رفع الأرضي عن نفس الوجه بينما تعطي بقية الـ Phases دائماً قيمة مقاومة عالية سواء كان الأرضي موصلاً بالوجه الذي نختبره أم لا ، فهذا يدل على صحة الوجه من الجهتين. وينفذ هذا الاختبار على بقية الأوجه، ويكتفي بأقل جهد اختبار لتحديد الأوجه حيث أننا هنا لا نقيس شدة عزل.

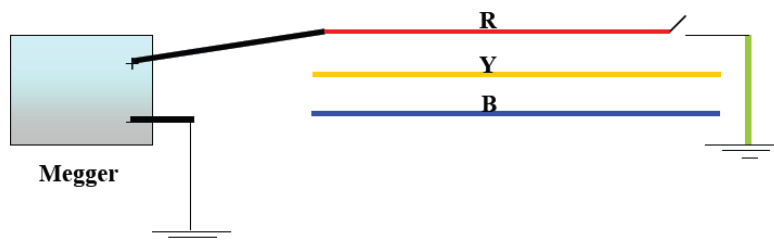


Figure 25-1 اختبار تحديد الأوجه

25.2.2 اختبار الاستمرارية

يتم إجراء ذلك الاختبار للتأكد من عدم وجود أى قطع في الكابل ويستخدم أيضاً في حالة تحديد صحة توصيل الأوجه مع بعضها قبل التركيبات وذلك عندما يتم توصيل أطراف كابلين لاسيما في حالة وجود عدد من الـ Joints قبل عمل أطراف التوصيل النهائية لتجنب الخطأ في الترتيب .

فمثلاً لتحديد فائز R يتم توصيل الفائز R بسلك الـ Shield من جهة وقراءة قيمة المقاومة بواسطة جهاز

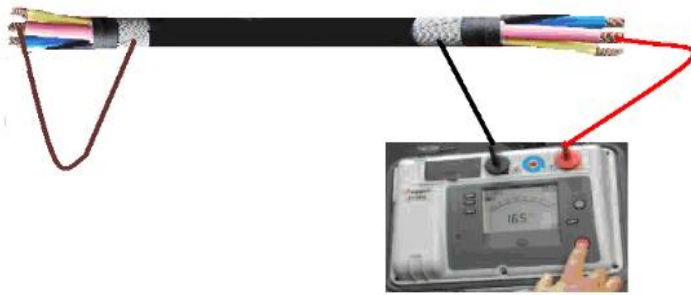


Figure 25-2 اختبار الاستمرارية

الميجر بين الـ R والـ Shield من الجهة الأخرى كما في شكل 2-26 ، فإذا كانت قراءة المقاومة تتراوح من 0 إلى 20 ك أوم فتدل على الاستمرارية ، أما إذا كانت قراءة قيمة عالية مثلاً 10 ميجا أوم فيدل ذلك على حدوث تبديل للفايزات أو وجود قطع في الموصل وهكذا في باقى الفازات.

25.2.3 اختبار قياس مقاومة الموصل للتيار المستمر

DC Conductor Resistance

يصنع الموصل عادة من معدن ذي مقاومة كهربية منخفضة ويقوم هذا الموصل بدور توصيل التيار الكهربى والطاقة الكهربائية ولذلك لابد من اختبار مقاومة الموصل للتأكد من عدم زيادتها عن القيمة المسموح بها حسب مواصفات IEC (الجمعية الدولية للكهربوتقنية) حيث ينتج عن ذلك مجموعة من المفقودات Losses تعمل على رفع درجة حرارة الموصل وتحد من قدرة حمل الكابل للتيار (Current Carrying Capacity) المعتمدة على أقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الموصل بصفة مستمرة.

ويمكن إيجاد مقاومة أي موصل طوله L ومساحة مقطعه A من المعادلة التالية:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية للموصل (Resistivity) وتقاس بالـ mΩ

ويتم قياس مقاومة كل موصل لعينة من الكابل بطول لا يقل عن متر، وباستخدام التيار المستمر فقط من خلال استخدام جهاز Micro ohmmeter ، الذى يقوم بحقن DC Current وقياس فرق الجهد على الطرفين المراد قياس المقاومة بينهما وتحسب المقاومة من العلاقة التالية :

$$R = \frac{V}{I} \quad (\Omega)$$

يتم قياس درجة الحرارة أثناء الاختبار ويحسب منها مقاومة الموصل لكل Km عند درجة حرارة $20^\circ C$ حسب العلاقة التالية :

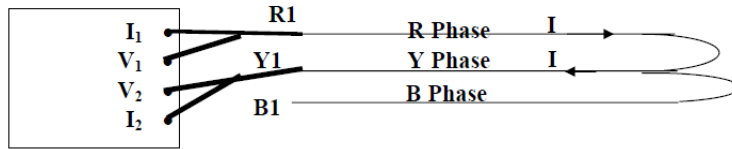
$$R_{20} = \frac{R(\text{measured})}{L(1 + \alpha_{20}(T - 20))}$$

حيث :

- L : الطول الفعلي للكابل (Km)
 R_{20} : مقاومة الموصل عند $20^{\circ}C$ (Ω / Km)
R : القيمة المقاسة لمقاومة الموصل لوجه واحد (Ω)
 α_{20} : المعامل الحراري لمقاومة المعدن عند درجة حرارة $20^{\circ}C$ وتساوي بالنسبة للنحاس
مثلا $0.00393 =$
T : درجة حرارة الموصل عند الاختبار

ويتم مقارنة R_{20} المقاسة بقيمته المسموح بها حسب المواصفة IEC - 60228 .

لاحظ أن استخدام التيار المستمر ضروري لأنه في حالة استخدام AC Supply فإننا نقيس المعاوقة Z التي تشمل المقاومة بالإضافة إلى الـ Reactance .



ولإجراء الاختبار نقوم بعمل قصر (Short) على جميع الموصلات في النهاية البعيدة وتوصيل طرف جهد و تيار على الوجهين كما في الشكل 3-26:

قياس المقاومة Figure 25-3

وفي هذه الحالة فإن الجهاز يقيس مجموع مقاومتي الوجهين R & Y وتعاد القياسات بنفس الطريقة لباقي الأوجه (R&B - Y&B) ثم يتم حساب مقاومة كل وجه من العلاقات التالية :

$$R = \frac{(R + Y) - (Y + B) + (R + B)}{2}$$

$$Y = (R + Y) - R$$

$$B = (R + B) - R$$

في حالة استخدام أسلاك لعمل قصر في النهاية البعيدة فإنه يجب أن تكون ذات مقاومة منخفضة (مساحة مقطع كبيرة) ويجب طرح مقاومة القصر وكذلك أسلاك الجهاز من القيمة المقاسة.

25.2.4 اختبار قياس سعة الكابل (Cable Capacitance)

تحسب سعة الكابل لكل كيلومتر (C') من العلاقة :

$$C' = \frac{C_{measured}}{L}$$

حيث :

$C_{measured}$: القيمة المقاسة للسعة الكلية للكابل وتقاس μF

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة جهاز (capacitance meter). حيث يتم توصيل طرف الموصل بالجهاز والطرف الآخر مؤرض كما في الشكل 26-4. وتقاس السعة بوحدة الميكرو فاراد (μF)

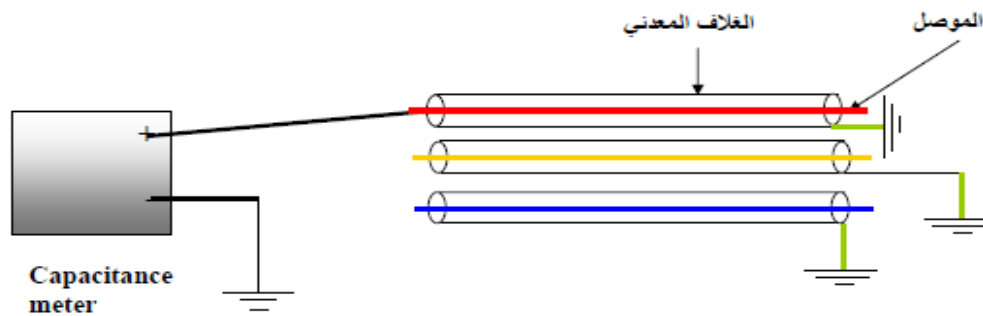


Figure 25-4

وقد اكتسبت سعة كابلات الجهد العالي والفائق أهمية اقتصادية كبيرة نظرا لاعتماد كل من تيار الشحن (Charging Current) والقدرة الغير فعالة (VAR) والفقد في العزل عليها اعتمادا مباشرا كما تلعب هذه السعة دورا هاما في تحديد مسافة نقل الطاقة باستخدام الكابلات (الطول الحرج للكابل Critical Length of Cable)، وكلما قلت قيمة السعة كلما كان ذلك أفضل من وجهة نظر العوامل السابق ذكرها.

25.2.1 اختبار الغلاف الخارجي DC Sheath Test

يستخدم الغلاف الخارجي فوق الغلاف المعدني أو فوق طبقة تسليح الكابل (Armor) بحيث تكون آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة والمواد المحيطة به وعادة يستخدم في صناعته البولي فينايل كلورايد (PVC) أو مادة البولي ايثيلين عالي الكثافة (HDPE)

ويجب إجراء الاختبار على الغلاف الخارجي بغرض التأكد من أنه لم يحدث أي شروخ أو تلف فيه أثناء عملية التركيب ويتم هذا الاختبار بتسليط جهد مستمر 10 kV لمدة دقيقة واحدة بين الطبقة المعدنية (metallic Sheath) وبين الغلاف الخارجي المصنوع من الـ PVC ، و نقوم في هذا الاختبار بتأريض مادة الـ PVC بطلائها بمادة Semi-Conductor Material وبالتالي تكتمل الدائرة الكهربائية و نستطيع أن نحكم على مدى تحمل الـ sheath للجهد .

ونسجل قراءة تيار التسريب (Leakage Current) ويعتبر الاختبار ناجحاً في حالة عدم حدوث انهيار للغلاف (No Breakdown) ، ويوضح الشكل 26-9 طريقة الاختبار :

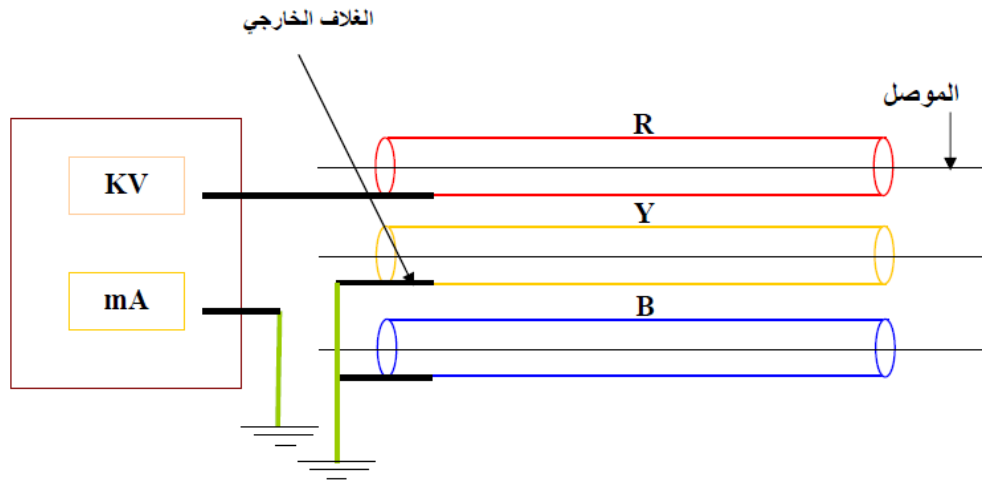


Figure 25-5 اختبار عزل الغلاف الخارجي

25.2.2 اختبار مقاومة التماس في صناديق التوصيل

ويسمى Contact Resistance Test of Link Boxes ويعمل في نهاية الاختبارات للتأكد من جودة الربط وذلك بقياس المقاومة باستخدام Micro-ohmmeter وهذا يؤثر في نظام الـ (Cross Bonding) المستخدم لمنع مرور التيار في الغلاف المعدني ويعمل الاختبار بين جميع نقاط الربط بين الوصلات Links وبين وصلات Sheath Voltage Limiter, SLV. ويجب أن لا تزيد المقاومة عن $20\mu\Omega$.

25.2.3 اختبار صحة الترابط العرضي للغلاف المعدني

Cross Bonding Verification Test of Metallic Sheath

تتولد في الغلاف المعدني للكابل تيارات حثية (Inducted Currents) والتيارات دوامية (Eddy Currents) نتيجة للفيض المغناطيسي المتغير الناتج عن مرور التيار المتردد في موصل أو موصلات الكابل نفسه أو في موصلات الكابلات المجاورة له. وتسبب هذه التيارات في ظهور فقد Loss في الغلاف مما يقلل من قدرة الكابل على حمل التيار.

ويتم إجراء هذا الاختبار بواسطة حقن تيار متردد (AC Current) للثلاثة أوجه (على الموصلات) مع عمل قصر من الجهة الأخرى وقياس التيار في الغلاف المعدني ويجب أن لا يزيد التيار في الغلاف عن 3% من التيار المحقون وتوضح القيمة صحة الترابط.

وسبب وجود التيار العالي (الذي يزيد عن 3%) يرجع لعدة عوامل منها أن تكون هناك أطوال غير متساوية أو قد تكون هناك دوائر Live بجوار الكابل مع رطوبة التربة أو خطأ في التصميم.

بما أنه لا يفترض توصيل الأغلفة بالأرضي إلا عند بعض صناديق التوصيل فإنه يتم عزلها عن الأرض بواسطة مقاومة غير خطية (Non Linear Resistance) تعمل على الحد من الجهد المستحث للغلاف في حالة حدوث الأعطال ولذا تعرف بأنها Sheath Voltage Limiter, SVL حيث تنخفض قيمة مقاومة العزل فتصبح مسارا لتيارات الغلاف إلى الأرض، أما في الوضع الطبيعي فتبقى مقاومتها عالية ولذا تختبر للتأكد من عازليتها ويجب أن لا تنقل قيمة العازلية عن $1G\Omega$ عندما تختبر بجهد 1000V.

25.2.4 اختبار قياس مقاومة الأرضي عند كل صندوق

Earth resistance measurement of link boxes

تعتبر طريقة هبوط الجهد (fall of potential method) الطريقة الأكثر استخداما لقياس مقاومة الأرض ، وفي هذه الطريقة (انظر الشكل 26-6) يمثل E إلكترود التأريض و P و C هما إلكترودان مساعدان ، وإذا مر تيار بين E و C وكان فرق الجهد بين E و P هو V ، فإن خارج القسمة V/I هي مقاومة الأرضي . ويسمى جهاز قياس مقاومة الأرض بـ Earth tester. في الشكل S هي مصدر تيار (current source) ذو جهد ثابت. و الـ A جهاز أميتر بينما الـ V جهاز فولتميتر .

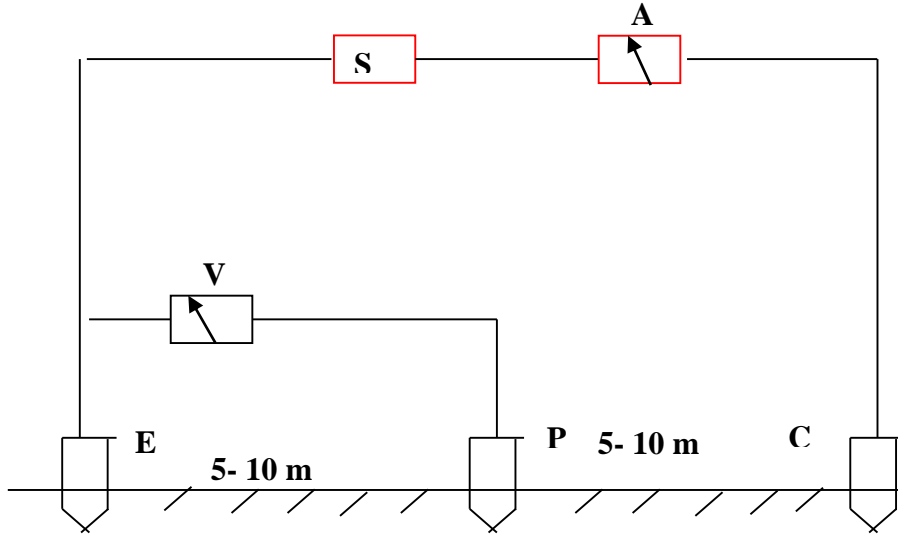


Figure 25-6 قياس مقاومة الأرضى

وتتأثر مقاومة التربة بعدة عوامل منها :

- نوع التربة .
- محتوى الرطوبة.
- نوع الأملاح المذابة ودرجة تركيزها .
- درجة الحرارة والضغط .
- الحجم الحبيبي.

وعند قياس مقاومة الأرض عند أي موقع يستحسن أن تجرى عدة قياسات بقيم مختلفة للمسافة بين الالكترودات وذلك للتوصل إلى القيمة المتوسطة (Average Value). ويجب أن لا تزيد مقاومة الأرض عن 10Ω . وبوجه عام فإن قيمة المقاومة اللازمة تتناسب عكسيا وحجم تيار القصر ، فكلما كبر هذا التيار وجب أن تصغر المقاومة.

25.3 مجموعة اختبارات العازل

نظرا لعدم وجود مادة ذات عزل كامل ($R = \infty$) فإنه بمجرد توصيل الكابل عند طرف الإرسال بمصدر جهد فإنه سيتولد فرق جهد بين الموصل والغلاف المعدني (Metallic Sheath) فيمر تيار متسرب (Leakage) خلال العزل في اتجاه إشعاعي (Radial) من الموصل إلى الغلاف وتعرف مقاومة العازلية بأنها المقاومة لمرور هذا التيار.

ملحوظات هامة:

- يتم قياس جودة العزل بين الموصلات وبعضها وبين الموصلات والأرض حيث تكون القيمة المقبولة للعزل وفقا للقاعدة التي تقول أن كل واحد كيلوفولت من الكابل يقابله واحد ميغا أوم . فمثلا لو كان كابل بجهد تشغيل 11kV فتكون أقل قيمة مقاومة مسموح بها هي 11 ميغا أوم .
- يتم عمل الاختبار قبل وبعد اختبار الجهد العالي المشروح تفصيلا في نهاية الاختبارات
- يتم إجراء هذا الاختبار بواسطة الميجر (5000 فولت) حيث يتم قياس العازلية مابين الفازات الثلاثة وبعضها وبين الفازات الثلاثة والأرضي وقد تصل قيمة العازلية إلى (100ميغا أوم فأكثر) في حالة لو كان الكابل جديدا . أما لو كان الكابل قديما فقد تصل إلى (1ميغا أوم).
- مدة هذا الاختبار دقيقة واحدة. والسبب في ذلك أن الكابل يسحب في البداية تيار شحن لمكثفاته Charging Capacitive Current بالإضافة إلى تيار التسرب إن وجد ، وعند التشغيل لمدة 60 ثانية ينخفض الـ Capacitive Current بالتدريج ويستمر فقط تيار التسرب إن وجد وهو الذي يحدد جودة العزل.
- لا تؤخذ مقاومة العازل كمعيار يقاس به سلامة العازل إلا في حالة وجود تسرب مياه أو رطوبة إلى العازل حيث تؤدي إلى انخفاض كبير في مقاومة العازل مما يشير إلى سوء حالته في هذه الظروف (وعمليا نقارن بين قيم الفازات الثلاثة أو قيم دائرة مع دائرة أخرى مماثلة).
- تعتمد مقاومة العزل على نوعية العزل ودرجة الحرارة. وعلى عكس مقاومة الموصل فإن مقاومة العازل تتناسب عكسيا مع طول الكابل ودرجة الحرارة. ولذا فهذا الاختبار يتم أولا بعد غمر العينة في ماء درجة حرارته 20 درجة مئوية لمدة ساعة على الأقل ، والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجة الحرارة القياسية . ويعاد الاختبار بعد غمر العينة في درجات حرارة أعلى (تحددها المواصفات) والنتائج هنا تمثل مقاومة العزل عند درجات الحرارة أثناء التحميل.

وتعتمد مقاومة العازل على عدة عوامل هي :

- 1- الأبعاد الهندسية للكابل وهي مساحة مقطع الموصل وسمك العازل وطول الكابل ولذا كان لابد من الرجوع لمواصفات الاختبار التي تعطى طول العينة التي ستوضع تحت الاختبار ، فتغيير الأبعاد يعنى تغيير النتائج.
- 2- مدى احتواء العازل على أي رطوبة أو بخار ماء
- 3- نوع وتكوين العازل
- 4- درجة الحرارة

5- عمر الكابل

ويتم مقارنة القيمة المقاسة بالمواصفة IEC 60840.

ومن أهم الأجهزة المستخدمة في هذه الاختبارات جهاز الميجر (شكل 26-7) ، الذى يستخدم لقياس عازلية الكابل و قياس مقاومة العطل باستخدام جهد يولد داخليا حتى 5000 فولت.



Figure 25-7 جهاز الميجر

ويتم ضبط الميجر وفقا لنوع للجدول 26-1.

Table 25-1

تحديد جهد الاختبار بالميجر

جهد التشغيل	كابل جديد	كابل قديم	قيمة مقاومة
upto 1.1KV	500 V dc for 1 min.	1.0KV dc for 1 min.	50MΩ
11KV	1.0KV dc for 1 min.	2.5KV dc for 1 min.	200MΩ
33KV	2.5KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ
66KV	5.0 KV dc for 1 min.	5.0 KV dc for 1 min.	500MΩ

25.3.1 اختبار العازل باستخدام الـ Hipot

هناك أربعة اختبارات أساسية ضمن مجموعة اختبارات عزل الكابل ، الأول منها فقط يكون باستخدام الميجر وهو اختبار قياس مقاومة العزل ، بينما لا يصلح استخدام الميجر فى الباقي ، بل يجب استخدام جهاز الـ HiPot لأن طبيعة الاختبار تحتاج إلى جهد أعلى من المتاح فى الميجر كما سنرى.

وكلمة "Hipot" تعني جهد عالي وهي اختصار (High Potential) ، وفيما يلي تفاصيل الاختبارات الأربعة.

25.3.2 اختبار تحديد قيمة مقاومة العزل Insulation Resistance

Test

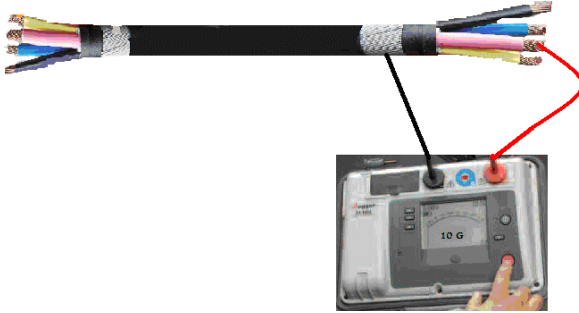


Figure 25-8 قياس شدة العزل

يجيب هذا الاختبار على السؤال التالي: هل

مقاومة العزل عالية بدرجة كافية؟

في هذا الاختبار تقاس قيمة مقاومة العزل بين كل Phase على حدة وبين الغلاف المعدني للكابل كما في الشكل 8-26 التي تعرض طريقة قياس عزل الفازة الحمراء. وتقاس أيضا مقاومة العزل بين كل two phases .

ويستخدم هذا الاختبار لتحديد مقاومة العطل

وبالتالي تحديد الجهاز المناسب استخدامه لقياس مسافة العطل كما سنرى في الفصل التالي.

ويجب تفريغ الشحنة على الكابلات بعد إجراء الاختبار لأن مكثفات الكابل تظل مشحونة بجهد الاختبار (تذكر أن الميجر له جهد DC) ومن ثم هناك خطر على العاملين أن لمس أحدهم الكابل وهو مشحون ، ولذا نقوم بتفريغ هذه الشحنات بتوصيل الكابل بالأرض.

25.3.3 اختبار تحديد جهد انكسار العازل Dielectric Breakdown

Test

يجيب هذا الاختبار على السؤال : عند أي جهد ينكسر العزل بين موصلين ؟

ونستخدم في هذا الاختبار جهاز الـ Hipot ، حيث يأخذ موصلين معزولين وغير متصلين ببعضهما Open Circuit ويطبق عليهما فولتية عالية جدا (تحدد طبقا لجهد العزل من المواصفات) ، ويراقب سريان التيار بينهما بعناية . و في الحالة المثالية لن يسري تيار مطلقا ، فإذا مر تيار أكثر من اللازم فهذا يعني أن النقطتين أو الموصلين لم يتم عزلهما بصورة حسنة وهناك تسريب في نقطة ما ، و بذلك يفشل في الاختبار.

ويتم هذا الاختبار باستخدام جهاز يسمى (Hipot tester) (شكل 9-26) حيث يطبق على الكابل الجهد اللازم لعمل الاختبار ويعرض من خلال الشاشة الموجودة به قيمة التيار المتسرب الذي يفترض أن يكون صغيرا جدا. ويحتوي الجهاز أيضا على (overload protection) حتى إذا زادت قيمة التيار عن حد معين يقوم بعملية الفصل . مدة الاختبار تصل إلى 60 ثانية أو أكثر .



Figure 25-9 Hi-pot Tester

لاحظ أنه قد يكون هناك فجوة بالعزل في أحدهما ، وهذه يصعب اكتشافها بجهد الميجر العادى ، ولذا يجب استخدام الجهد العالي لكشف هذه النوعية من الأعطال.

25.3.4 اختبار مدة تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test

يجيب هذا الاختبار على السؤال : هل سيتحمل الكابل الجهد المتوقع للمدة الزمنية المطلوبة؟ حيث نقوم بوضع الجهد المطلوب (طبقا للمواصفات) لفترة الزمنية المحددة ونراقب سريان التيار . ففي الحالة المثالية يجب أن لا يسير أى تيار خارج الموصل طوال مدة الاختبار .

25.3.5 اختبار كفاءة العزل (Tan delta(δ)

يسمي هذا الاختبار أيضا (loss angle) و (Dissipation factor) ويستخدم هذا الاختبار لقياس مدي جودة عازل الكابل حيث يستخدم للتنبأ بالعمر الافتراضي للعازل.

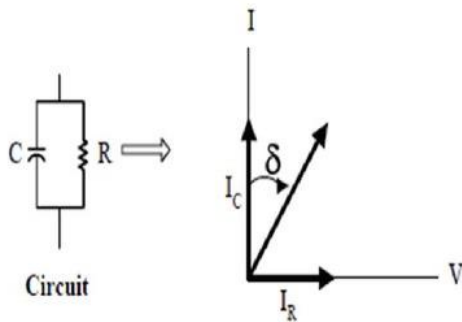


Figure 25-10

في الحالة الطبيعية يكون في حالة المكثف التيار يسبق الفولت ب 90 درجة وفي حالة الكابل يمكن تمثيل الموصل والعازل كمكثف ولكن نتيجة الإضافات التي تضاف لمادة العازل لا تكون الزاوية مساوية ل 90 درجة في هذه الحالة الزاوية بينهم تسمى δ loss angle كما هو موضح في الشكل 10-26 .

حيث بزيادة تلك الإضافات في مادة العازل يزداد (resistive current) بزيادة الزاوية يعني زيادة I_R ولكن الكابل المثالي الذي تكون فيه الزاوية مساوية للصفر وكلما اقتربت للصفر أصبح العازل أفضل .

والكابل في هذا الاختبار لابد أن يكون (energized) ، ثم يقوم (tan delta controller) بأخذ القياسات حيث يتم أخذ القياسات على خطوات متتالية .

في البداية يكون جهد الاختبار مساويا لـ V_0 (normal line to ground voltage) ، فإذا كانت قراءات $\tan \delta$ جيدة أي أن الزاوية تقترب من الصفر يكون الكابل جيد مبدئياً ، وفي هذه الحالة نغير جهد الاختبار لتصل قيمته من 1.5 ثم إلى ضعف قيمة V_0 .

يتم إجراء الاختبار على الكابل باستخدام VLF AC HIPOT وتعني Very Low Frequency أى عند تردد منخفض جدا يصل إلى 0.1Hz وليس 50 Hz وذلك لسببين:

1- الأول أنه إذا تم الاختبار عند 50 Hz سنحتاج إلى مصدر طاقة عالي جدا (very high power supply) ولكن عند استخدام تردد 0.1Hz نحتاج مصدر طاقة أقل 500 مرة من المصدر الذي نحتاجه في حالة 50 Hz.

2- السبب الثاني أن قيمة $\tan \delta$ تزداد بنقصان قيمة التردد مما يجعل عملية القياس أسهل وفقاً للعلاقة التالية

$$\tan \delta = I_R / I_C = 1 / (2\pi f C R)$$

و الاختبارات الأربعة السابقة هي أدوات تستعمل لفهم بشكل أفضل كيف سيؤدي الكابل عمله و كذلك لمراقبة أي تغييرات في أدائه مستقبلاً. وبالطبع يجب أن يكون جهد الاختبار عالياً لأننا نتعامل مع مقاومات عالية جداً والجهد الصغير لا يكشف عيوب هذه المقاومات حتى لو كان العزل مخدوشاً بالعين المجردة ، ومن هنا لزم استخدام الجهد العالي.

علماً بأن اختبار انهيار و انكسار العازل Dielectric breakdown testing يستعمل في مراحل تصميم و تأهيل المنتجات حيث يساعد في توصيف أقصى جهد للكابل. كما أنه في الكثير من المواصفات يتطلب إجراء اختبار تحمل مقاومة العازل Dielectric Withstanding Test على كل كابل منتج.

25.3.6 مقارنة قيم الاختبارات:

قيم مقاومة العازل يجب أن تكون وفقاً للبيانات المرفقة من المصنع وأن لم تتوفر يجب أن تكون متطابقة مع قيم الجدول 2-26

Table 25-2

Insulation Resistance Test Values Electrical Apparatus and Systems

Nominal Rating of Equipment in Volts	Minimum Test Voltage, DC	Recommended Minimum Insulation Resistance in Megohms
250	500	25
600	1,000	100
1,000	1,000	100
2,500	1,000	500
5,000	2,500	1,000
8,000	2,500	2,000
15,000	2,500	5,000
25,000	5,000	20,000
34,500 and above	15,000	100,000

وأن لم تتوافق مع هذه القيم يجب أن يتم التحقيق في ذلك والتدقيق أكثر في العينة المختبرة.

25.3.7 اختبار (PD) Partial Discharge Testing:

التفريغ الجزئي (partial discharge) يعني حدوث شرارات كهربية صغيرة خلال العزل في كابلات الجهد العالي والمتوسط. وكل شحنة تفريغية هي نتيجة انكسار عزل فراغ هوائي أو بسبب وجود شروخ في العزل أو تلف طبقة شبه الموصل الخارجية أو تلف الوصلات في الكابل وعدم كفاءة النهايات (splices and termination). يؤدي PD إلى تآكل العزل مع الوقت وفي النهاية إلى انهياره بالكامل.

ينص الكود الكهربى IEC على أن هذه التفريغات الكهربية هي أول إشارة إلى تدهور حالة العزل ، فمنذ أكثر من 50 عام والشركات تقوم بعمل اختبارات (PD) على كافة المعدات الكهربية المعزولة فالمعلومات الناتجة من هذا الاختبار توضح كفاءة العزل وتأثيره على سلامة المعدات ككل. ولأنه دائماً ما يحدث PD عندما يكون العزل في طريقه للانتهاء فيمكننا التنبؤ بمستقبل الوصلات في الكابل وجودة النهايات أثناء التركيب.

وهناك أنواع من PD tests منها :

Online PD test

يتم إجراء الاختبار أثناء عملية التشغيل الطبيعية للكابل فهو أقل تكلفة من offline test ولا يحتاج إلى فصل الكابل وخروجه من الخدمة تحت ظروف قياسية من الجهد ودرجة الحرارة وهذا الاختبار غير مدمر ولا يسبب أى ارتفاع فى درجة حرارة الكابل .

Offline PD test

يتميز هذا النوع من الاختبار بأنه يوفر الفرصة لقياس استجابة الكابل لمستوى جهد معين والتنبؤ بأداء الكابل بالمستقبل بدون إحداث fault كما أنها تتميز بقدرته على تحديد مكان الخطأ بالتحديد مما يمكن العامل من التخطيط لصيانة الكابل.

25.4 اختبارات تحمل العزل للجهد العالي

انهيار أي كابل تحت تأثير الجهد يتوقف على العوامل التالية:

- زمن تأثير الجهد
- شكل الموصل
- درجة الحرارة
- كمية الفراغات الموجودة بالكابل

وتنشأ هذه الفراغات بالكابل (شكل 26-11) نتيجة دورة تحميل الكابل وازدياد الحرارة ما بين أقصى حمل وأدنى

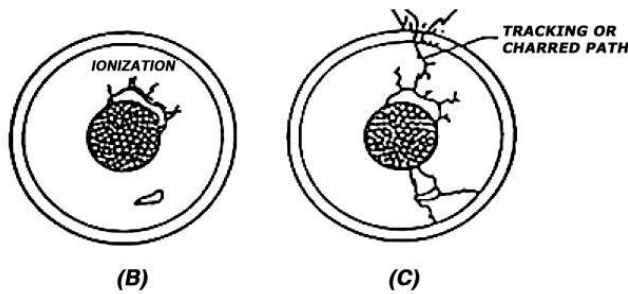


Figure 25-11

حمل مما يؤدي إلى تمدد وانكماش الكابل والذي يؤدي بدوره إلى تكون الفراغات والتي يتأين الغاز بداخلها نتيجة الجهد العالي للكابل مما يؤدي إلى انهياره في النهاية .

والجدير بالملاحظة هنا أن الجهد

المستخدم عند اختبار الكابل القديم أقل

من الجهد المستخدم عند اختبار الكابل الجديد ، والغرض من هذه الاختبارات كشف هذه العيوب.

25.4.1 اختبار الجهد العالي لدوائر 132 ك.ف ، أو أعلى

يتم إجراء الاختبار للتأكد من سلامة الكابل وقدرته على تحمل جهد وتيار التشغيل لفترة طويلة وللتأكد من عدم وجود عيوب داخلية بالكابل (مثل الوصلات الداخلية التي تربط الكابلات ببعضها) حيث يتم اختيار قيمة جهد الاختبار وفقاً للقاعدة التي تقول أن قيمة جهد الاختبار تساوي أربعة أمثال جهد العزل المقنن لفترة 15 دقيقة على مرحلة واحدة أو عدة مراحل. ويمكن إجراء هذا الاختبار باستخدام جهد ثابت أو جهد متردد وستتم المقارنة بين ميزات وعيوب كل نظام لاحقاً.

يعتمد هذا الاختبار على الجهد الكهربى العالى المتصل بالكابل لظهور أى عيوب صناعية مثلاً مثل فراغات هوائية أو ضعف وصلات أو شرخ بالعزل حيث أنه بتطبيق جهد عالى ومرور تيار عالى يؤدي ذلك إلى زيادة حرارة الكابل وبالتالي يؤدي إلى زيادة عمق الفجوة وبالتالي زيادة ضعف العزل - إن كان فعلاً ضعيفاً - مما يسبب انهياره أثناء الاختبار .

ويعتبر اختبار الرنين ذو التردد المتغير (Variable Frequency) أحد الطرق المستخدمة في اختبارات الجهد العالى كما في الشكل وفكرته أن حدوث الرنين سيتسبب فى مرور تيار عالى يمكن أن نجعله يساوى تيار التشغيل بالتحكم فى L الموجودة بالدائرة ، حيث يعتبر الكابل عند الاختبار كالمكثف الكهربى وعند ربطه على التوالي مع الـ (Reactor) فإن الدائرة الناتجة هي دائرة رنين (Resonance) ، وبحسب ترددها من المعادلة :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

حيث :

C : السعة الكهربائية للكابل بالـ F.

L : (Inductance) (H).

وتكون قيمة تيار الاختبار تساوى

$$I_{test} = \omega CV$$

وقد نحتاج إلى استخدام two reactors على التوازي كما في الشكل 12-26 نظراً لزيادة سعة الكابل بزيادة طوله مما يؤدي إلى زيادة تيار الاختبار حسب المعادلة السابقة والحل يكون باستخدام two Reactors و يتم توصيلهم على التوازي ، وبالتالي نحصل على تيار كبير مع ثبوت فى قيمه الجهد كما هو موضح بالشكل .

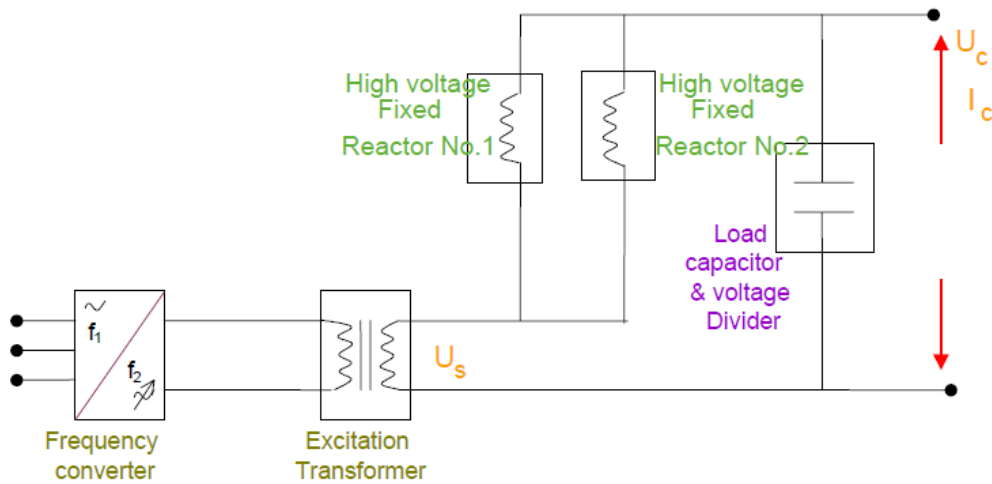


Figure 25-12 اختبار الجهد العالى للكابلات

وفي حالة كون جهد الاختبار أعلى من جهد الـ Reactor فإننا نقوم باستخدام two reactors على التوالي كما هو في الشكل 13-26 حيث يتضاعف الجهد ولا تتغير قيمة التيار .

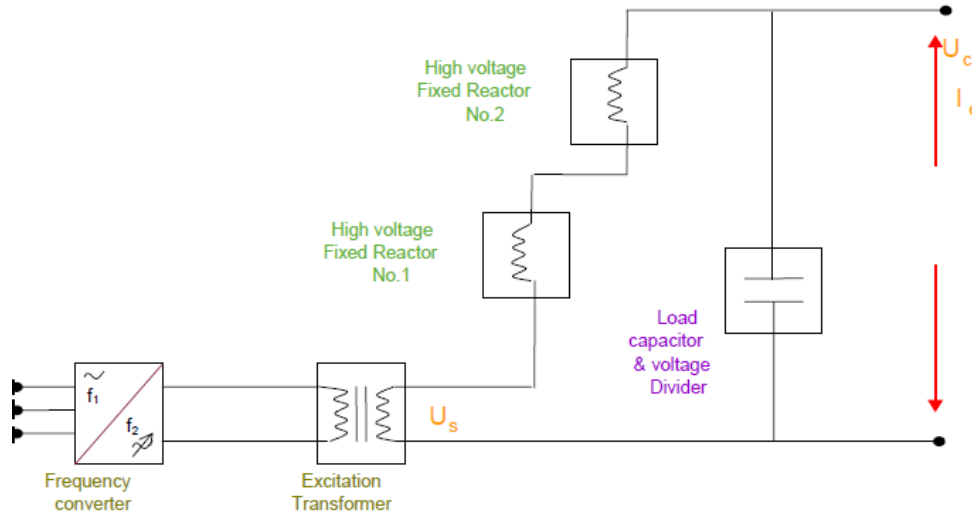


Figure 25-13

ملحوظة: اختبارات جميع أنواع كابلات الضغط العالي يتم إجراؤها في مصر من خلال مركز أبحاث الجهد الفائت الموجود بطريق مصر اسكندرية الصحراوي .

25.4.2 تأثير استخدام الجهد العالي المستمر DC على كابلات القدرة :

عند إجراء اختبار على كابلات الضغط العالي لاينصح باستخدام DC Supply لاختبار العازل وذلك لأنه بمجرد استخدام الـ DC سينشأ مجالا مغناطيسيا ثابتا و بمجرد ثبات المجال المغناطيسي فإنه من الممكن أن يتسبب فيما يسمى بـ Water Tree مما قد ينشأ عنه حدوث Break Down في العازل .

وهناك مشاكل أخرى منها:

- 1- بعض الأعطال مثل الفراغات داخل الوسط العازل (Bubbles) أو القطع والخدش (Scratching) بعمق محدد داخل الوسط العازل لا يظهر أثرها مع استخدام الـ **HVDC** ، وهذه المشاكل تؤدي إلى حدوث تفريغ جزئي (Partial Discharge) عند تطبيق الجهد المتردد بعد إدخال الكابل للخدمة مما يؤدي إلى انهيار الوسط العازل مع مرور الزمن رغم تجاوزه الاختبار ومن ثم تضيع قيمة هذا الاختبار .
- 2- توزيع الحمل الكهربائي على جسم الكابل والوصلات والنهائيات يكون حسب المقاومة النوعية (ρ) وليس حسب السماحية (ϵ) كما في حالة (AC) مما ينتج عنه توزيع غير متساوي للإجهاد الكهربائي إضافة إلى أن توزيع المجال الكهربائي عند الوصلات والنهائيات سيكون مختلف تماما عن التوزيع الفعلي عند التشغيل .

• الجهد المستمر DC يتناسب طرديا مع المقاومة $E_1 / E_2 = \rho_1 / \rho_2$

• أما المتردد AC فيتناسب عكسيا مع السماحية $\epsilon_1 / \epsilon_2 = E_1 / E_2$

3- ينشأ بسبب هذا الجهد تراكم بعض الشحنات (Space Charge) خصوصاً في الفراغات بين الكابل والملحقات (Accessories) وأيضاً قريباً من الحدود الداخلية والخارجية للمادة العازلة ، وعند تشغيل الكابل بجهد الشبكة المتردد (AC) تتضاعف هذه الشحنات وتشكل (Stress) على الكابل مما يؤثر سلباً على عمر الكابل وملحقاته ويجعله عرضة للانهياب بشكل سريع .

4- يؤدي إلى تدهور حالة الكابل نتيجة تزايد التشجير المائي والكهربي (Water & Electrical Treeing) وتضاعفها بعد دخوله الخدمة .

5- تبين أن هناك بعض العيوب لا يمكن كشفها بالجهد المستمر (DC) إلا إذا وصل جهد الاختبار إلى 8 أضعاف الجهد المقنن للكابل (U_0) ، وهذا يبين عدم قدرة الجهود المعطاة في المواصفات والتي تصل إلى ثلاثة أمثال (U_0) فقط من التأكد من سلامة الكابل . لذا كان لابد من البحث عن البديل.

25.4.3 تأثير استخدام الـ HVAC

عند إجراء الاختبار على كابلات الضغط العالي باستخدام Supply AC ستظهر مشكلة أخرى مختلفة عن المشاكل الخاصة بالـ HVDC وهي أن الكابلات الطويلة تحتاج إلى تيار شحن كبير وبالتالي سنحتاج إلى جهاز كبير و ملفات كبيرة وهذا كله مكلف ، لذلك لا يستخدم الـ AC Supply . والجدول التالي يقارن بين الأسلوبين السابقين.

DC	AC	
صغيرة	كبيرة	حجم معدات الاختبار
منخفضة	عالية	طاقة الاختبار
مؤثر بشكل كبير	غير مؤثر	التأثير على عمر الكابل
يسبب شحن فراغية	لا يسبب شحن فراغية	الشحن الفراغية
فعال للكابلات الزيتية	فعال لجميع الكابلات	الفعالية
يكشف عيوب التأثير الحراري	يكشف جميع العيوب	الكشف عن العيوب
يكون تشجير	لا يكون تشجير	التشجير
لا يشابه جهد الشبكة	مقارب لجهد الشبكة	تقارب القيمة مع الجهد الشبكة

25.4.4 استخدام تردد منخفض VLF (Very Low Frequency)

تبين حتى الآن عدم ملائمة استخدام DC supply و أيضا AC supply للأسباب السابقة التي تم شرحها ، والحل الأمثل هو شئ وسطى بينهما أو ما يسمى (VLF) (Very Low Frequency) . وبما أنه AC فلن تظهر مشاكل الـ DC السابقة ، وبما أنه منخفض التردد جدا فسيُسحب تيار منخفض لانخفاض التردد حسب

$$I = \omega C V$$

ويتم إجراء الاختبار بطريقة بسيطة عن طريق توصيل مخرج الجهد العالي المعزول لجهاز VLF بموصل الكابل (conductor) الجاري إجراء الاختبار عليه وتوصيل طرف الأرضي مع طرف الجهد الثاني للجهاز بالـ (grounding shield) كما هو واضح في الشكل 14-26.

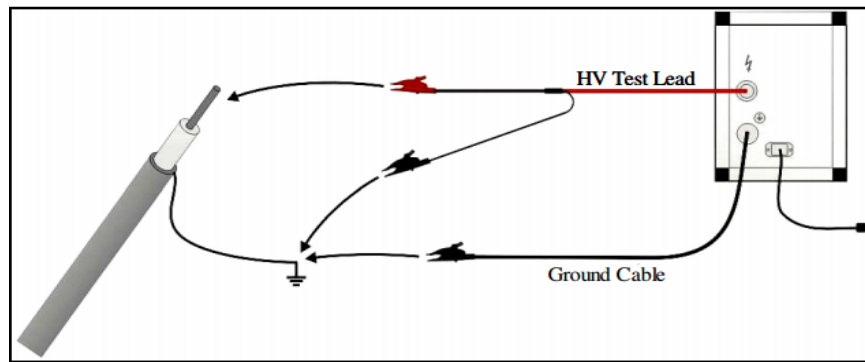


Figure 25-14

ثم يتم وضع الكابل على جهد الاختبار لمدة معينة وفقا للمواصفة IEEE 400.2 (المواصفة تنصح بأن يكون جهد الاختبار ثلاث أضعاف الجهد العادي (Normal line to ground voltage) (3V_o) لمدة من 30 إلى 60 دقيقة.

و الجدول 26-3 يبين قيم أقصى جهد يتم وضع الكابل عليه وفقا للـ IEEE 400.2

Table 25-3

Cable Rating phase to phase (RMS)	Installation Test phase to ground	Acceptance Test phase to ground	Maintenance Test phase to ground
kV RMS	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)	kV RMS (or peak)
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Table 1: IEEE 400.2 VLF Test Voltage Levels for Sinusoidal, Cosine-Rectangular. Voltage Pe values are shown in brackets for Cosine-Rectangular and Squarewave.

إذا اجتاز الكابل هذا الاختبار فسيكون نسبة فرصة الكابل على تجنب أي انهيار في العازل أثناء تشغيله تصل إلى 95%. ويتم إجراء هذا الاختبار عند تردد منخفض 0.1 HZ كما يوجد أيضا ترددات 0.02 & 0.05 هرتز.

Table 25-4

قيمة اختبار الجهد العالي للكابلات

جهد التشغيل	جهد الاختبار		تيار التسرب	
	كابل جديد	كابل قديم	كابل جديد	كابل قديم
upto 1.1KV	3KV	660V	0.5mA	2mA
11KV	18KV	6.5KV	0.5mA	2mA
33KV	60KV	19.5KV	0.5mA	2mA
66KV	115KV	38KV	0.5mA	2mA

في الكابلات القديمة يتراوح جهد الاختبار ما بين $2U_0 - 2.5U_0$ حسب عمر الكابل . وهذا الاختبار (VLF) تختبر به كابلات الجهد المتوسط لتحديد ما إذا كان هناك عطل فيها أم لا كما سيتم شرحه بالتفصيل في الفصل التالي.

26

إكتشاف أعطال الكابلات

الكابلات الكهربائية هي أقل عناصر الشبكة الكهربائية تعرضاً للأعطال و ذلك نتيجة تعرض الكابلات لاختبارات عديدة -كما شرحنا سابقاً- حيث يتم اختبار الكابلات في المصانع فور تصنيعها لضمان جودتها و كذلك اختبارات بعد التركيب و أيضاً قبل التشغيل مما يقلل فرص حدوث أعطال في الكابلات ، و لكن هذا لا يمنع حدوث بعض الأخطاء والأعطال نتيجة لعدة أسباب نذكرها في الجزء التالي.

ومن الضروري معرفة نوع العطل في الكابل قبل إجراء الاختبارات اللازمة عليه ، علماً بأن أعطال الكابلات لا تعتمد على جهد التشغيل فهي نفسها متكررة في كابلات الجهد المتوسط والجهد المنخفض على السواء كما أن الأجهزة التي تقوم باكتشاف وتحديد مكان الأعطال لا تعتمد على جهد التشغيل ، حيث يتم تشغيلها والبحث عن العطل أثناء فصل الكابل من الخدمة أى بدون جهد. مع الأخذ في الاعتبار ألا تزيد الجهود المستخدمة لتحديد العطل عن جهد التشغيل.

وسيتم في هذا الفصل التعرض للأنواع المختلفة للأعطال وأسباب حدوثها وكيفية علاجها وطرق اكتشافها.

26.1 الأسباب الأساسية لانتهاء الكابلات:

وفيما يلي بعض أسباب الأعطال التي تتعرض لها الكابلات (نقلاً بتصريف عن تقرير لشركة توزيع مصر الوسطى) .

26.1.1 أسباب تتعلق بالكابل نفسه

- تركيب كابل بمساحة مقطع لا تتناسب مع الحمل الواقع عليه.
- عدم رباط نهايات الكابلات جيداً.
- إنقطاع موصل الكابل و هذا يحدث نتيجة لأعمال الحفر التي تتم في مسار الكابلات المدفونة تحت الأرض لذلك يجب وضع شريط تحذيرى فوق هذا المسار لينبه القائمين بأعمال الحفر لتلافى حدوث أى أضرار في الكابل.

26.1.2 أسباب تتعلق بالعزل خصوصاً

تتجم معظم أعطال الكابلات الكهربائية عند تلف العازل أو انهياره بعد فقدانه لخواص العزل بسبب ارتفاع درجة الحرارة عن الحد المقرر ولمدة طويلة أو حدوث الصدمات الميكانيكية. ومن الجدير بالذكر أن درجة حرارة التشغيل في معظم أنواع الكابلات يجب ألا تتجاوز 58 م . ومن هذه الأسباب:

1. يحدث عطل في الكابل إذا تعرض العازل إلى جهد أكبر من الذى يمكن أن يتحملة ، و يمكن حدوث ذلك نتيجة Lightning and Switching .
2. انهيار عازل الكابل نتيجة وجود شوائب بداخله أو فقاعات و التى تسبب تفريغ جزئى مما يؤدى إلى تدهور تدريجى فى خواص العازل و انهياره .
3. ارتفاع درجة حرارة العازل عن درجته الطبيعية مما يؤدى إلى تدهور فى خواص العازل و انهياره ، و يحدث هذا نتيجة تعرض الكابل لأحمال زائدة لفترات طويلة .
4. تدهور العازل نتيجة طول فترة الاستخدام أو نتيجة عوامل خارجية مثل الرطوبة .

26.1.3 أسباب ميكانيكية

يحدث هذا النوع من الأعطال عادة أثناء نقل بكر الكابلات وتحميلها من مكان إلى مكان فمثلاً لو حدث تحطيم لبكرة وعليها الكابل ووضعت على جانبها فهذا الوضع يؤدى إلى إتلاف عزل الكابل . ويحدث أيضاً عندما يتم تشوين بكر الكابلات لفترة طويلة فى مكان ما دون رقابة وتعرضه للعبث ، وإتلافه بآلات حادة .

26.1.4 أسباب كيميائية

تتعرض الكابلات أثناء تخزينها وإستعمالها إلى عوامل كيميائية مختلفة وخاصة فى الظروف الجوية كارتفاع نسبة الأملاح وغيرها ، وتتعرض أسلاك وشرائط الصلب المستخدمة كوقاية ميكانيكية للتأكسد والتآكل. يحدث التآكل الصدأ فى الغلاف المعدنى للكابل وقد يكون سببه كهربائياً أو كيميائياً أو بسبب الاثنين معاً . والتآكل أو الصدأ (corrosion) نتيجة تأثيرات كيميائية يتوقف على نوع الأرض الممتد فى داخلها الكابل ، فالترربة أما تكون حمضية أو تكون قلوية وقد تحتوى على مواد عضوية يكون لها تأثير على المدى البعيد على تآكل غلاف الكابل الخارجى وكذلك التسليح و عزل الكابل مما يؤدى إلى انهياره .

أما عن التآكل الصدأ نتيجة عوامل كهربية فهو يتوقف على مكان الكابل بالنسبة لحركة النقل والمواصلات الكهربائية مثل الترام والمترو حيث أن تيار التشغيل يعود إلى مصدره عن طريق القضبان الحديدية الممتدة فى الأرض وفى هذه الحالات تتولد تيارات شاردة تأخذ طريقها إلى الغلاف المعدنى للكابلات أو المواسير للحماية للكابل لأنها تجد مساراً سهلاً للمرور فيها بدلاً من طريق باطن الأرض فى طريق عودتها للمصدر الأصلي للتيار .

وتسير هذه التيارات فى الموصلات وتخرج منها نحو مصدر التيار ونتيجة لمرور التيار فى الكابل وخروجه منه مع مرور الوقت يودى ذلك إلى عملية الاستقطاب التى تسبب تآكل الغلاف المعدنى و انهياره ولعلاج ذلك فإنه يلزم توصيل الغلاف المعدنى للكابل بأرضى محطة الترام أو المترو لتجنب هذه التيارات الشاردة وتأثيراتها .

26.1.5 أسباب تتعلق بسوء طريقة المد

هذا العيب يكون سببه المباشر عدم وجود خبره كافية لدى القائم بالتنفيذ فى فرد ومد الكابلات فيجب اختبار المسار السليم للمد والفرد وأن يكون المسار بقدر المستطاع بعيدا عن كل أسباب تعرضة للتلف بعد فرده ومده مثلا أن يكون بعيد عن شبكة المياه والصرف الصحى والتليفونات ومواسير البخار والغلايات كما فى بعض المصانع وكما أنه من الواجب أن يكون عمق الحفر لرمى الكابل كافى وألا يكون قريبا من سطح الأرض مع وجود مسافة بين الكابلات التى توجد متوازية و ممتدة فى مسار واحد وكذا من الواجب أن يتم تحديد الوسط المحيط للكابل سواء رمل أو بوتامين مع الأخذ فى الاعتبار نوع التربة ومكان المد بالنسبة للضغوط الميكانيكية للمشاة والمركبات وعلى أساس ذلك يتم اختبار نوع الكابل مسلح أو بدون تسليح . كما أنه من الواجب أيضا فى حالة وجود انحناء للكابلات أثناء الفرد يراعى أصغر قطر للانحناء وهو يتوقف على قطر الكابل .

26.1.6 أسباب تتعلق بسوء اللحام

ويحدث هذا عادة فى الوصلات وعلب النهاية ولذلك يجب أن يكون القائم بعمل العلب ذو خبرة ومهارة ودقة فى اللحامات وإلا أصبحت نقاط اللحام ضعيفة فى الكابل ولذا يجب أن يكون اللحام جيد مع عدم ترك زوايا حادة فى اللحامات لحدوث تجمع عالي للمجال المغنطيسى عندها وكما أنه يكون هناك تركيزا عاليا للضغوط على درجة العزل وفى حالة إزالتها يجعلها متساوية على جميع مناطق العزل .

26.2 مراحل اكتشاف الأعطال

هناك خمس مراحل لاكتشاف مكان العطل بدقة فى الكابل:

المرحلة الأولى :

فى حالة الشك فى وجود عطل على الكابل من عدمه هى إجراء اختبار الجهد العالى VLF الذى سبق الإشارة إليه فى نهاية الفصل السابق . وفى هذا الاختبار يحقن كل فاز بجهد يساوى تقريبا 3 أمثال الجهد المقنن وذلك للكابلات الجديدة ، فمثلا الكابل جهد 11kV يكون الـ Phase voltage له يساوى تقريبا 6.6kV وبالتالي ثلاثه أمثال الجهد تقريبا تساوى 19kV ، أما الكابل القديم فيكتفى بضعف الجهد فقط.

ويوضع الكابل (بالطبع بعد فصله من أى دائرة) تحت هذا الجهد لمدة 15 دقيقة ، فإذا كان الكابل سليما ، فسيكون التيار المتسرب فى حدود 150 ميكروأمبير لكل كيلومتر من طول الكابل ، ويجب أن تتساوى قيمة التيار المتسرب فى الفازات الثلاثة. أما إذا زاد التيار المتسرب عن هذه القيمة فهذا يعنى وجود عطل ما ، وبالتالي ننقل للمرحلة الثانية من اكتشاف العطل.

المرحلة الثانية:

وهذه مرحلة هامة جداً قبل البدء فى تحديد مكان العطل ، وهى معرفة قيمة مقاومة العطل بواسطة (Megger) الميجر سواء ٥٠٠٠ فولت أو ١٠٠٠ فولت ، وبناء على قيمة مقاومة العطل يتم تحديد الجهاز المناسب للاستخدام من أجل قياس مسافة هذا العطل (قياس مبدئى تمهيدا للتحديد الدقيق فى مرحلة لاحقة) كما هو موضح بالجدول أدناه:

الجهاز المستخدم	مقاومة العطل
Pulse Echo صدى النبضة	المقاومة $> 200 \Omega$
القنطرة	$> 1000 \Omega$ المقاومة > 2 ميجا Ω
جهاز الحرق	2 ميجا $\Omega >$ المقاومة > 50 ميجا Ω
التيار النبضى (عطل وميضى)	Ω المقاومة < 1000 ميجا

يستخدم جهاز الميجر لقياس قياس مقاومة العطل حيث يولد جهدا داخليا من 500 فولت ويصل حتى 10000 فولت كما فى الشكل 27-1.



Figure 26-1 قياس مقاومة العطل

وسيتم شرح الأجهزة الواردة فى الجدول السابق لاحقا.

المرحلة الثالثة :

بناء على قيمة مقاومة العطل المقاسة في المرحلة السابقة **قد نحتاج إلى** عملية تفحيم (يصبح كالفحم) مكان العطل ، بمعنى أن نحرق مكان العطل بتيار عالي وجهد منخفض حتى ينهار ، وبالتالي يسهل اكتشافه ، لأن الأعطال العالية جدا في مقاومتها لا يمكن اكتشافها إلا بتخفيض قيمة هذه المقاومة من خلال عملية التفحيم.

المرحلة الرابعة :

استخدام الجهاز المناسب لتحديد مسافة مبدئية لمكان العطل مثل الـ Pulse Echo أو Bridge إلخ بناء على النتائج السابقة. (التفاصيل في الجزء التالي مباشرة).

المرحلة الخامسة:

تحديد المكان الدقيق للعطل عن طريق تفريغ شحنات من الجهد العالي بالكابل من جهاز يسمى بالشاكوش ، وهذه الشحنات تحدث أصواتا في مكان العطل يمكن اكتشافها بواسطة سماعات خاصة. (التفاصيل في الجزء بعد التالي).

26.3 القياس المبدئي لمسافة العطل

توجد عدة أجهزة تستخدم لقياس مسافة العطل بنسبة خطأ معقولة لكنها لا تعطى مكان العطل بدقة متناهية وإنما فقط تقريب من مكان العطل تمهيدا لاستخدام نوع آخر من الأجهزة لتحديد الدقيق لمكان العطل.

ومن الأجهزة التي تعطى فقط مسافة العطل:

26.3.1 جهاز صدى النبضة (الردار) (Pulse Echo)

تقوم فكرة هذه الأجهزة (شكل 2-27) على أنها ترسل الطاقة الكهربائية على هيئة نبضات ثم تنعكس الطاقة عند نقط عدم الاتصال Discontinuity ومنها نقطة العطل بالطبع ، وكمية الانعكاس تعتمد على قوة الضرر كما سنرى تفصيلا من خلال الرسومات في الجزء التالي .



Figure 26-2 TDR

وعند دفع نبضات كهربية في بداية الكابل فإن الطاقة الكهربية لهذه النبضة تنتقل داخل الكابل بسرعة تقل قليلا عن سرعة الضوء الذي تسير به لو مرت في وسط ليس به عزل ، والسبب في ذلك أن التيارات خلال سيرها في الموصل تقوم بشحن مكثفات العزل ، وبالتالي تتأثر بوجود العزل من عدمه ، كما تتأثر بالطبع بقيمة المسافة بين النقطتين .

ملحوظة :

قد يصاحب حركة النبضات حدوث شرارة كهربية مع صوت فرقعة ، وهذا الصوت يتم سماعه من خلال جهاز الاستقبال الذي يتمثل في السماعة التي تستخدم مع أجهزة التحديد الدقيق لمكان العطل كما سنرى لاحقا .

26.3.2 كيفية تحديد مسافة العطل باستخدام Pulse Echo

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ انعكاس النبضات الكهربية (Time Domain Reflectometry) وهو نفس المبدأ الذي يعمل عليه الرادار .

فمن المعروف أن الموجات الكهربية (Traveling Waves) مثل الموجات أو النبضات الكهربية تنتقل على الموصلات الهوائية بسرعة الضوء بينما تنتقل على الموصلات التي بداخل الكابلات بسرعة قدرها

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon r}}$$

حيث c هي سرعة الضوء في الفضاء

حيث ϵr السماحية النسبية لمادة العزل

وينعكس جزء من الموجة المتنقلة عند نقط التحول transition point ، وهي النقط التي تتغير عندها المعاوقة المميزة للكابل . وتسمى النقطة التي يقع عندها الخطأ أو العطل بنقطة تحول . ومعامل الانكسار عند هذه النقطة بصفة عامة هو :

$$\rho = \frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1}$$

حيث

$Z1$: المعاوقة قبل نقطة التحول

$Z2$: معاوقة الخرج عند نقطة التحول

وإذا اعتبرنا أن العطل في الكابل له مقاومة R_f كما هو مبين في الشكل 27-3 فإن المعاوقة عند نقطة التحول هي

$$Z_2 = R_f * \frac{Z_1}{R_f + Z_1}$$

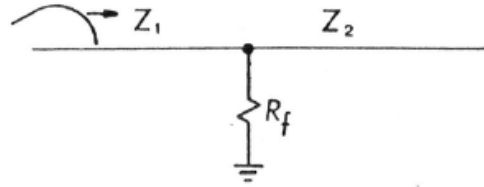


Figure 26-3

ويصبح معامل الانعكاس

$$\rho = -\frac{Z_1}{2R_f + Z_1}$$

من ثم ، فعند حدوث short على الموصل فإن $Z_2 = R_f = 0$ ومن ثم تكون :

$$\rho = -1$$

وعند حدوث Open Circuit في الموصل تكون $Z_2 = \infty$ ومن ثم تكون

$$\rho = +1$$

وبناء على ذلك يمكن فهم الأشكال الموجودة في الجزء التالي.

26.3.3 تصنيف الأعطال بالنسبة لجهاز الـ Pulse Echo

من الواضح مما سبق أنه إذا كانت مقاومة العطل صغيرة تكون الموجة المنعكسة سالبة وقوية ، وإذا كانت المقاومة كبيرة فالموجة المنعكسة تكون موجبة وقوية .

- في حالة القصر (short circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالسالب
- في حالة القطع (open circuit) تنعكس الموجة بأكملها بالموجب

وبالتالي يمكن أن نفهم أشكال الموجات التي تخرج من الجهاز في الحالات التالية :

الحالات القصر الصريح – بدون مقاومة – ، وحالات القطع Open الصريح (شكل 27-4):

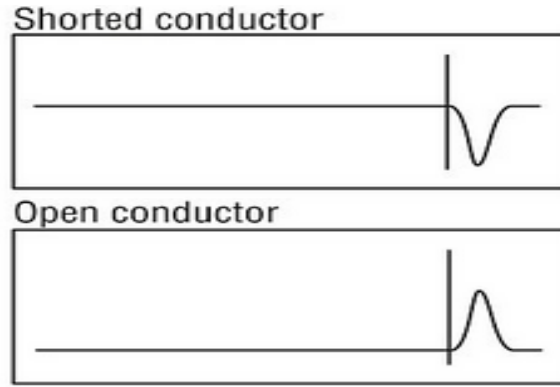


Figure 26-4

في حالة وجود عطل قصر خلال مقاومة صغيرة يكون الشكل الناتج كما في (شكل 27-5):

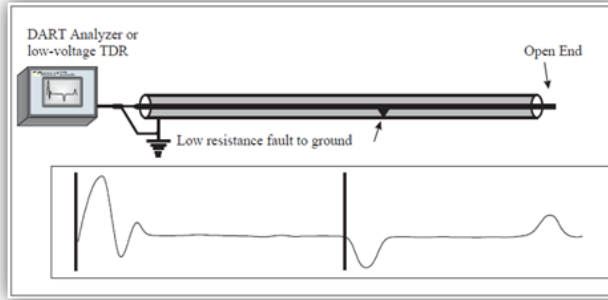


Figure 26-5

وفي حالة عدم وجود عطل يكون الشكل كما في (شكل 27-6) ، والانعكاس هنا بسبب نهاية الكابل وليس بسبب قطع فيه.

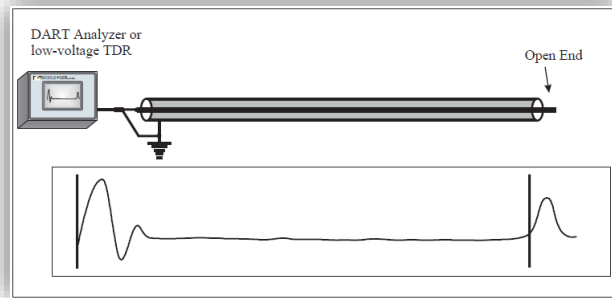


Figure 26-6

أما في حالة وجود وصلات فيكون كما في شكل 7-27

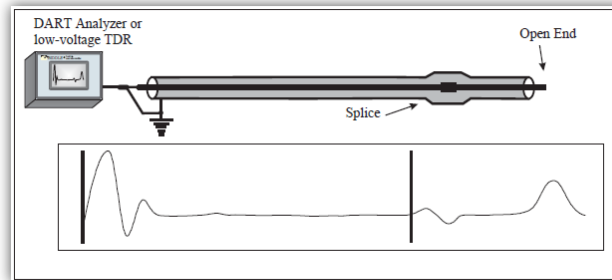


Figure 26-7

وفي حالة وجود T section يكون كما في الشكل 8-27.

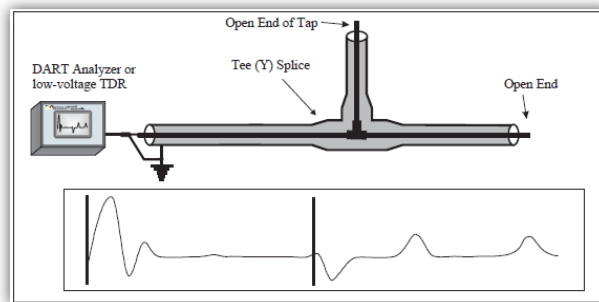


Figure 26-8

وأخيرا ، في حالة وجود عطل مع وصلة مع T section يكون الشكل كما في 9-27.

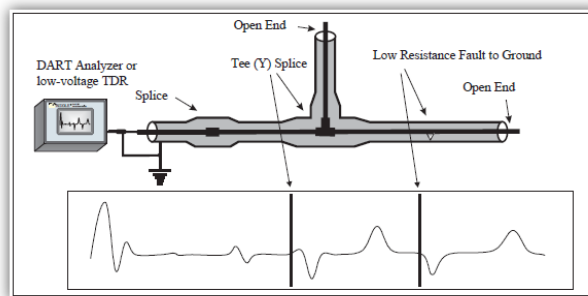


Figure 26-9

ملحوظات :

- يكون استخدام TDR في حالة كون مقاومة العطل تساوى صفرا أى وجود Short بالكابل أدى إلى عمل لحام هو الحل الوحيد ، حيث في تلك الحالة لا يوجد فلاش أو شرارة ولا يستطيع جهاز السماع سماع صوت الموجة المرتدة ، وبالمثل في حالة وجود فتح بالكابل حيث أيضا لا يوجد انعكاس ولا نستطيع

سماع صوت الموجة ، ولذلك يكون استخدام جهاز الرادار فى تلك الحالتين حلا وحيدا ، مع ملاحظة أن التحديد الدقيق هنا يكون مستحيلا وسيعتمد على التقريب.

- إذا لم يكن هناك عطل فسيكون على الأقل لدينا انعكاس واحد من نهاية الكابل كما فى الشكل 10-27 ، وهذا يعنى أن الجهاز يمكن استخدامه أيضا فى قياس أطوال الكابلات.

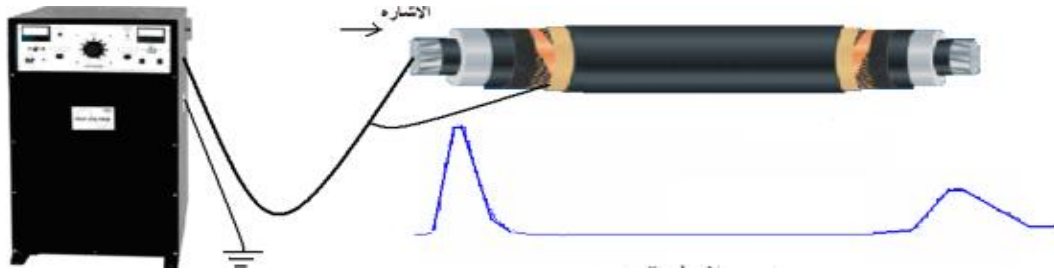


Figure 26-10

أما إذا وجد قطع فسيحدث انعكاس عند العطل وعند نهاية الكابل أيضا ولكننا بالطبع سنأخذ الأول كما فى الشكل 11-27. (ولو القطع بشكل مكتمل فسوف لا يحدث انعكاس عند نهاية الكابل).

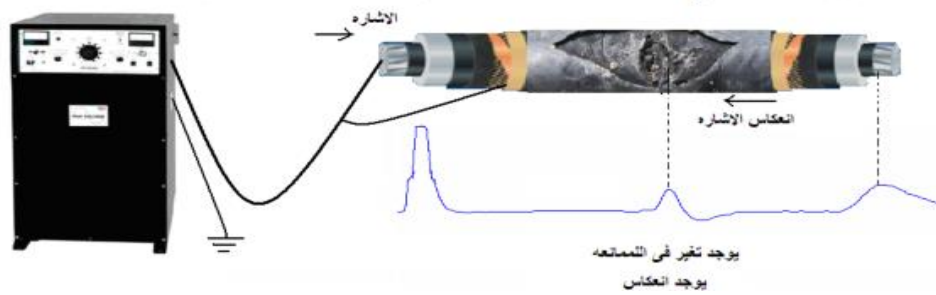


Figure 26-11

26.3.4 كيفية حساب المسافة

يقوم جهاز TDR بإرسال نبضة كهربية فى الموصل الذي به عطل وقياس الزمن المنصرم من لحظة إرسال النبضة حتى وصول النبضة المعكوسة ، ويتم تحديد مكان العطل من معادلة بسيطة

$$x = \frac{1}{2} v * t$$

x: مسافة بعد نقطة العطل عند نهاية الكابل

v: سرعة انتشار النبضة على الموصل

t: الزمن المقاس

لاحظ أننا قسمنا على 2 لأن الموجة تذهب وتعود أى تقطع فعليا ضعف مسافة العطل.
علما بأن السرعة يمكن قياسها أولا بمعلومية كابل سليم ومعروف طوله.

26.3.5 مشاكل استخدام الـ TDR:

من أبرز هذه المشاكل:

- أن الطول الفعلي في مسار الكابل لا يساوى المقاس على الأرض وذلك بسبب وجود انحناءات في مسار الكابل .
- عدم تحديد سرعة انتشار الموجة بدقة و ذلك نتيجة اختلاف مادة العزل في أكثر من جزء في الكابل.

تستطيع أجهزة الـ TDR الحديثة أن تحدد موقع العطل بدقة فائقة وذلك بغض النظر عن قيمة مقاومة العطل بعد الربط مع مولد النبضات ، أما الأجهزة القديمة الصنع المنفردة فهي لاتعطي قياسات دقيقة إذا زادت قيمة مقاومة العطل عن 200 أوم . وفى هذه الحالة يجب قياس القيمة التقريبية لمقاومة العطل بواسطة جهاز أوميتر يعمل بالبطاريات وخاص باختبار الكابلات ولا يجوز فى هذه الحالة استخدام جهاز الميجر (megger) حيث أن الجهد العالي الذي يولده هذا الجهاز قد يتسبب في حدوث تفريغ بالشرر (spark-over) مما يعطى قراءة خاطئة لمقاومة العطل.

26.3.6 استخدام جهاز القنطرة (Bridge) لقياس مسافة العطل

تستخدم طريقة القنطرة فى تحديد نسبة مسافة العطل . فى البداية نقوم بعمل التوصيلات اللازمة كما هو موضح بالشكل 12-27 :

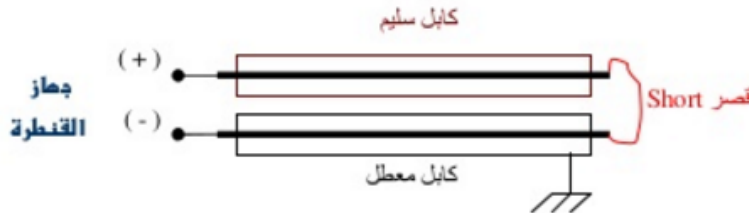


Figure 26-12

حيث يتم أخذ قراءة جهاز القنطرة ثم نقوم بحساب مسافة العطل حسب العلاقة التالية :

$$=L_f = \frac{2 \times L \times \text{Reading}}{100}$$

حيث :

L = طول الكابل

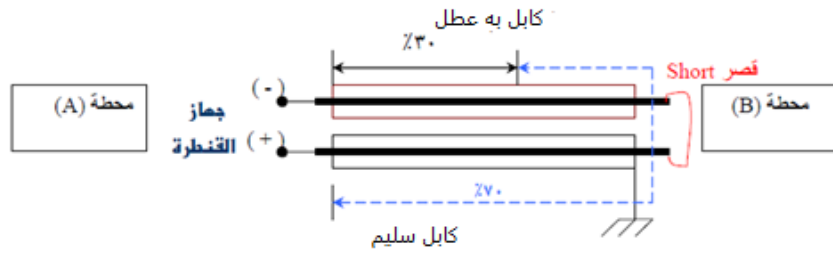
L_f = مسافة العطل

أما الـ Reading فهي نسبة مئوية من طول الكابل .

مثال :

قراءة القنطرة من المحطة (A) هي ٣٠٪ وطول الدائرة ٣٠٠٠ متر ما هي مسافة العطل؟

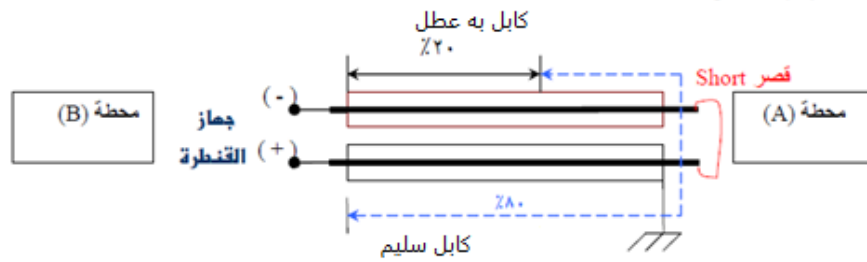
الحل:



$$L_f = \frac{2 \times 3000 \times 30}{100} = 1800 \text{ meters}$$

مسافة العطل من المحطة (A) = ١٨٠٠ متراً

وعند عكس أطراف القنطرة من نفس المحطة (A) لابد أن تكون قراءة القنطرة هي ٧٠٪ أي المكمل لـ ١٠٠٪ ، وبعد ذلك يتم التأكد من مكان العطل بذهاب الى المحطة الأخرى المحطة (B) كالآتي:



في هذه الحالة تكون قراءة القنطرة ٢٠٪ ، ولحساب مكان العطل:

$$L_f = \frac{2 \times 3000 \times 20}{100} = 1200 \text{ meters}$$

مسافة العطل من المحطة (B) = ١٢٠٠ متراً

وعند عكس الأطراف لابد أن تكون قراءة القنطرة هي 80% أي المكمل للـ 100%.

26.3.7 طريقة قنطرة موري Murray Bridge لقياس مسافة العطل

طريقة قنطرة موري تعتبر أقدم طريقة لتحديد مكان عطل الكابل ، وهي صورة معدلة من قنطرة هويستون Wheatstone bridge ويجب أن تكون مقاومة العطل صغيرة لكي يسمح بمرور تيار كاف ليمر في القنطرة وتعطى الاتزان المطلوب . وتعطى تلك الطريقة نتائج جيدة بنسبة خطأ (±1%) مع سهولة في التشغيل إلا أنه من عيوبها وعيوب أي قنطرة أنها تحتاج لموصل سليم بجوار الموصل المعطل.

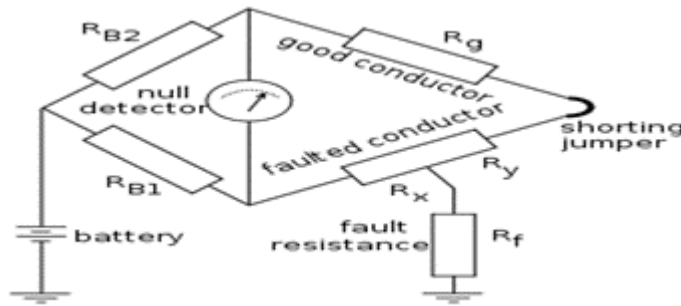


Figure 26-13

و في هذه الطريقة يتم توصيل نهاية من الكابل المعطوب بمصدر للجهد عن طريق مقاومتين و الطرف الآخر توصيله بالكابل السليم عن طريق دائرة قصر و يتم توصيل جلفانومتر بين

الكابلين كما هو موضح بالرسم شكل 27-13 ، و تصل هذه القنطرة إلى الاتزان عن طريق تغيير قيم المقاومتين R_{B1} ، R_{B2} حتى تكون قيمة الجلفانومتر تساوي صفر و بهذا تكون القنطرة متزنة

و يتحقق الاتزان عندما تتحقق هذه العلاقة

$$\frac{R_x}{R_g + R_y} = \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

و التي تكافئ العلاقة

$$R_x = (R_g + R_y) \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B2}}$$

قيمة المقاومة R_x تتناسب مع الطول L_x و لذلك يمكن حساب مسافة العطل عن طريق العلاقة

$$L_x = 2 \cdot L \cdot \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

و الـ L هو الطول الكلي للكابل الخاضع للاختبار و قيمته تتناسب مع المقاومة R_g و بذلك نستطيع قياس مسافة العطل في حالة اتزان القنطرة .

يفترض هذا الأسلوب وجود خطأ واحد مقاومته صغيرة إذا تمت مقارنتها بمقاومة العزل للكابل السليم و أن الموصلات داخل الكابل لها مقاومة منتظمة لكل وحدة طول .

26.4 التحديد الدقيق لمكان العطل

الطرق السابقة تعطي تقديرا لمسافة العطل لكن لا تحدد بدقة مكانه . وهناك عدة طرق لهذا التحديد الدقيق منها:

26.4.1 استخدام جهاز مولد النبضات : Surge Generator في تحديد

المكان

طريقة استخدام جهاز مولد النبضات (شكل 27-14) لتحديد أعطال الكابلات معروفة منذ عام 1940 وشهدت تطورا كبيرا مع زيادة الاعتماد على الكابلات الأرضية. ويسمى أيضا **بالشاكوش** كما سنرى والجهاز المستخدم يعرف بالمولد ذى الجهد العالي ويتكون من مصدر جهد ثابت يقوم بشحن مكثف بجهد عال ثم بعد ذلك يتم التفريغ فى الكابل عن طريق مفتاح يدوى أو أوتوماتيكي مع ضرورة تفريغ الشحنه من على الكابل بعد انتهاء الاختبار من خلال المقاومة الموجودة فى الجهاز . وتستخدم هذه الطريقة بالضرورة فى حالة كون المقاومة بين العطل والأرض كبيرة.



Figure 26-14 Surge Generator

وإذا كانت الطاقة فى المكثف التى تم تفريغها فى الكابل كافية لإحداث Partial discharge مع الأرض فإن مكان العطل سيتم تحديده بدقة حيث سيصدر عند العطل صوت يمكن رصده عن طريق سماعات خاصة بالمرور على مسار الكابل ويمكن أن تظهر اهتزازات فى التربة تلاحظ بسهولة ولذا يسمى هذا الجهاز كما ذكرنا بالشاكوش.

وقد تكون كمية الطاقة المرسله إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل تحت الاختبار عالية وفى هذه الحالة نحتاج إلى عدة موجات دفعية لشحن الكابل أولا ثم بعد ذلك يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ويمكن حساب الطاقة المخزنة فى مكثف الجهاز عن طريق المعادلة :

$$E = V^2 C/2$$

حيث E هي الطاقة المخزنة في مكثف الجهاز و V يساوي جهد الشحن للجهاز و C هي قيمة مكثف الجهاز .

ويمكن التحكم في هذه الطاقة أما بتغيير جهد المولد المستخدم أو بتغيير سعة مكثف الجهاز .

ويعمل الجهاز على توليد جهد على شكل Pulses ذات طاقة عالية بجهد خرج يتراوح من 15 إلى 25 كيلو فولت مما يجعل هذا النظام مناسب بدرجة كبيرة لتحديد مكان العطل في كابلات الجهد المتوسط والمنخفض علما بأن جهد خروج فيه يصل إلى 80 كيلو فولت للجهود العالية والفائقة .

ويحظر استخدام هذه الطريقة في حالة وجود مياه سواء من مطر أو غيره في محيط مسار الكابل وذلك للأسباب الآتية:

- أولاً : احتمالية تعرض العاملين لجهد الخطوة أو جهد اللمس نظرا لانخفاض المقاومة النوعية للتربة في هذه الحالة مع ضرورة مراعاة احتياطات الأمان اللازمة للتعامل مع الجهود العالية.
- ثانياً: أنه في حالة اختلاط التربة بالماء يزداد تماسكها وبالتالي فإن صوت التفريغ الكهربائي لا يسمع جيداً ويكون الصوت مكتوماً.

وبالرغم من دقة هذه الطريقة في تحديد الأعطال إلا أن لها بعض العيوب أهمها:

- استخدام الجهد العالي في تحديد مكان العطل في الكابل يتسبب في حرق جزء كبير حول مكان العطل مما يتسبب في تغيير جزء من الكابل وعمل وصلتين إن لم يكن الكابل به كورية تسمح بعمل وصلة واحدة.
- تعرض الكابل للجهود العالية يقلل من العمر الافتراضي للكابل وبالتالي يتعرض للتلف والتغيير في زمن قصير .
- الجهد المستخدم قد يقوم بشحن الفجوات الهوائية داخل الكابل والتي لا يتم تفريغها بعد الانتهاء من تحديد العطل مما قد يتسبب في انهيار الكابل بعد تحميله بجهد التشغيل
- وقد تكون كمية الطاقة المستهلكة إلى مكان العطل ضعيفة نتيجة لانخفاض جهد المولد أو لكون سعة الكابل عالية جداً وفي هذه الحالة نحتاج إلى إرسال عدة موجات لشحن الكابل أولاً ، ثم بعدها يبدأ ظهور صوت تفريغ العطل مع الأرض ، وهذه الموجات المتتابعة قد تسبب انهيار العزل في أماكن كان العزل فيها لا يزال بحالة جيدة لكنه انهار بسبب تتابع الـ Pulses. وعملياً نقن عملية استخدام مثل هذه الجهود فنستخدمها بأقل قيم وأقل زمن (يعني لا نقوم بإطلاقها على الكابل إلا بعد الذهاب للمكان المحدد بأجهزة المسافات ، وعند سماع العطل لا نطيل فترة السماع).

مثال

عند توصيل كابل به عطل على جهاز Surge Generator ، إحسب القدرة المستهلكة في الشرارة نتيجة العطل علما بأن سعة المكثف بالجهاز تساوى 750 ميكرو فاراد و كان جهد الاختبار يساوى 2 كيلو فولت والفترة بين كل موجة وأخرى هى 5 ثوانى.

الحل

$$E = (1/2) CV^2$$

$$E = (1/2) (750 \times 10^{-6}) (2000)^2 = 1500 \text{ Joules}$$

$$P = E/t = (1500) / (5) = 300 \text{ watts}$$

26.4.2 سماعات الاستشعار

يتم تحديد مكان العطل فعليا على الطبيعة بواسطة المخططات الصحيحة للموقع حيث يتم التحديد على المخطط و معرفة المكان تقريبا على الطبيعة ثم نستخدم جهاز Surge Generator بحيث ترسل نبضات فى مسار الكابل الموضحة فى المخطط و عند المكان المحدد يتم سماع العطل بواسطة السماعة (شكل 27-15).



استخدام السماعات Figure 26-15

ويتكون جهاز الاستقبال من قلب مغناطيسي وعليه ملف من السلك يتكون من 200 لفة من سلك النحاس المعزول ويتصل طرفا الجهاز بسماعة أذن بحيث يمكن سماع التيارات المستحثة داخل الملف بالأذن.

والفكرة هنا أنه عند مرور تيار متقطع داخل الكابل سيؤدي ذلك إلى توليد مجال مغناطيسي متغير حول الكابل وعندما يمر ملف الحث المغناطيسي في جهاز الاستقبال على مسار اتجاه طول الكابلات يتولد في ملفه تيار كهربي نتيجة لقطع خطوط المجال المغناطيسي له ، ويمكن سماع هذه التيارات داخل الملف بسماعات الأذن ومنها تحديد مكان الكابل.

وأحيانا يكون الموضع في أماكن غير ممهدة وتحتاج لمجهود للوصول إليها كما في الصورة التالية.



(الصورة للمهندس كامل بدرخان وهو يستمع لصوت العطل وقد وافاني مشكورا بصور ومعلومات قيمة عن اكتشاف أعطال الكابلات)

26.4.3 استخدام طريقة الـ Arc reflector في تحديد مكان العطل

هذه الطريقة (شكل 16-27) هي مزيج يجمع بين استخدام TDR والـ (surge generator) مع استخدام فلتر (arc reflection filter) بغرض حماية جهاز الـ TDR من الجهد العالي الذي سيولده الـ (surge generator).

هذه الطريقة تستخدم حين تكون مقاومة العطل عالية جدا لدرجة أن الـ TDR لا يكتشفه ، وفي نفس الوقت سنحتاج لجهد عالي جدا إذا استخدمنا الـ Surge Gen بمفرده ، فيكون الحل هو توليد قوس كهربائي بواسطة الـ Surge Gen عند نقطة الـ fault بحيث تقل مقاومة العطل إلى قيمة أصغر من 200 أوم ، وفي نفس الوقت

يكون جهاز الـ TDR متصلا ، مما يمكننا من قياس انعكاس الموجات على شاشة الـ TDR ، كما سيصدر صوتا ناتجا عن القوس وهذا أيضا يمكننا من تحديد موقع العطل صوتيا . وهذه الطريقة تقلل كمية الجهد العالي الذي يتعرض له الكابل وتجنب ظهور faults بعد إعادة تشغيل الكابل .

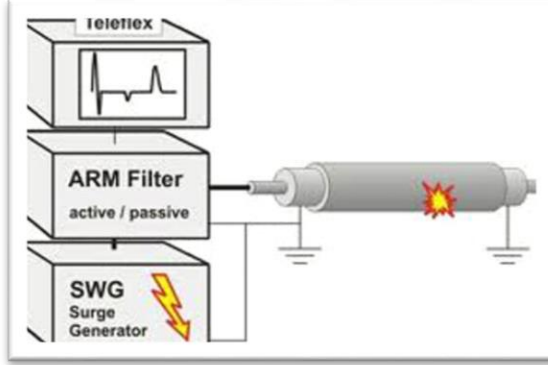


Figure 26-16 Arc Reflector

26.4.4 تحديد مكان العطل باستخدام المجال المغناطيسي

يجب قبل أي تجربة للكشف على كابل به عطل معرفة مسار الكابل من الرسومات الخاصة بالمشروع وإذا لم يتيسر ذلك فلا بد من استخدام جهاز تتبع مسار الكابل .

تستخدم هذه التقنية في تحديد مكان العطل المتصل بالأرض وتعتمد على حقن تيار مستمر في الكابل هذا التيار سيجد له مساراً إلى الأرض من خلال نقطة العطل ويكون توزيع المجال الكهرومغناطيسي الناتج عن هذا التيار كما هو موضح بالشكل 17-27 ومن شدة المجال الكهرومغناطيسي يمكننا ملاحظة أن شدة المجال أعلى ما يمكن عند نقطة الخطأ وأيضاً خطوط المجال الخارجة من عند نقطة الخطأ تنتزع في اتجاهين متضادين.

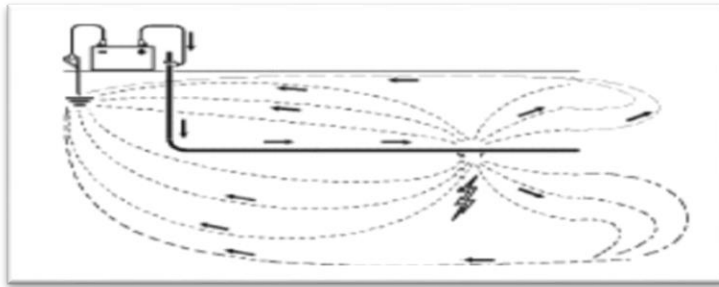


Figure 26-17

وبالتالي ، فباستخدام أي جهاز كاشف للمجال الكهرومغناطيسي وتتبع المجال حول الكابل نجد أن المجال يزداد كلما اتجهنا نحو نقطة الخطأ إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له ثم ينعكس اتجاهه وبالتالي نكون قد وصلنا إلى نقطة الخطأ.

علماً بأن سريان التيار في الكابل يسبب مجالاً مغناطيسياً في الهواء والأرض ويمكن قياسه باستخدام (simple magnetic loop antenna) حيث يمكن تحليل المجال المغناطيسي إلى مكون أفقي ومكون رأسي وتستجيب دائرة الاستشعار loop antenna للمكون الأفقي من المجال المغناطيسي الذي يكون بأقصى إثارة

فوق الكابل مباشرة يختلف شكل المجال المغناطيسي بجوار الـ fault لعدم مرور تيار ولذلك تقل قيمة المكون الافقى للمجال المقاس بـ antenna Loop بسرعة.

26.5 سيارات فحص الكابلات

وظيفة هذه السيارات اكتشاف الأعطال في الكابلات بدقة متناهية وسرعة كبيرة لسهولة حركتها من مكان إلى آخر . وهى تشتمل على نفس الأجهزة السابقة لكن فى مكان واحد. و سنعرض بعض الصور للأجزاء الداخلية داخل سيارة الفحص.

تحتوي السيارة (توجد لها مجموعة صور فى الأشكال التالية) على حوالى عدة أجهزة من خلالها يمكن كشف العطل وتحديد مكانه بالضبط ومن ثم التعامل معه :

1- جهاز الاختبار : هو نفس فكرة عمل جهاز الميجر ولكن يختلف عنه أنه يستطيع أن يتعامل مع جهود أكبر



Figure 26-18 سيارة فحص الكابلات

2- جهاز مولد نبضات + التلفلكس:
يقوم جهاز مولد النبضات بإرسال إشارة جهد على الفازة المعطلة ، ويقوم جهاز التلفلكس برسم منحنى يعبر عن الوسائط المختلفة داخل الفازة وتظهر مكان العطل على المنحنى كما يتم حساب المسافة من خلال مقياس رسم ومعايرة لحساب سرعة الإشارة ، ومن هنا فإن جهاز مولد النبضات والتلفلكس يقومان بمعرفة بعد مسافة العطل من مكان صدور الإشارة.

3- جهاز الشاكوش:

بعد استخدام جهاز (مولد النبضات + التلفلكس) نذهب إلى مكان العطل يقوم جهاز الحرق بإرسال إشارة جهد عالي جدا على الفازة المعطلة وعند مكان العطل يحدث شرارة أو خبطة نتيجة أن العطل يحدث فيه انهيار أكبر ومن خلال جهاز الشاكوش يتم سماع الخبطة (حيث هذا الجهاز يعتبر مكبرا لصوت تلك الخبطة حيث الكابل موجود على عمق متر أو أكثر) ثم يتم الحفر في هذا المكان حتى نصل إلى الكابل ثم يتم التعامل معه

4- مبيان الجهد : للأمان هناك جهاز آخر اسمه (مبين الجهد) وهو عمود طويل في نهايته جهاز (مثل مفك التست) إذا لمس أي موصل فيه تيار وليس عليه عازل يصدر الجهاز صفارة إنذار وبذلك نتأكد من أن الكابل قد تم فصله من المصدر قبل إصلاحه



Figure 26-19 الأجهزة المنوعة داخل السيارة

جهاز VLF / وجهاز المسار (Burn unit 15 KV) ومولد النبضات (Surge 3/6/12 KV) داخل السيارة



Figure 26-20 المنطقة خلف السائق بالسيارة



السيارة من الخلف وتظهر كابلات التوصيل Figure 26-21



Figure 26-22

التي يتصل بها الكابل المعطل RMU صورة لتوصيل كابل التوصيل من العربة إلى لوحة الـ
(الصورة منذ عدة سنوات ويظهر المؤلف إلى اليسار)

26.6 خلاصة بعض الخبرات الفنية

- 1- يلزم وجود أوجه phases عاطلة وأخرى سليمة لاستخدام القنطرة .
- 2- مقارنة صور الأوجه العاطلة بالأخرى السليمة ليسهل الوصول لمسافة العطل .
- 3- عند وجود عطل على الموصل conductor فهذا يعنى وجود عطل على الغلاف وعندئذ لدينا طريقتان لتحديد العطل أما باستخدام الموصل أو باستخدام الغلاف ، والعكس غير صحيح ، أى عند وجود عطل على الغلاف فليس بالضرورة أن يكون هناك عطل على الموصل ، ولذا يكون تحديد العطل عن طريق الغلاف فقط .
- 4- لتحديد العطل لا بد من معرفة المسافة وسماع الصوت عند العطل .
- 5- الأعطال منخفضة المقاومة (أقل من 100 أوم) لا يتم سماعها فيتم التحديد بطريقة المحاولة والخطأ trial and error
- 6- الأعطال عالية المقاومة (أكبر من 3 ميجا أوم) لا تشعر بها الأجهزة TDR ولا تعطى صورة أى انعكاس ، لذا يلزم حرق المقاومة (حرق مقنن للحفاظ على عمر الكابل وعلى قيمة مقاومة للعطل نستطيع بها سماع مكان العطل) لنقل قيمتها ونتمكن من الحصول على صورة واضحة.
- 7- فى أعطال الغلاف لو كان العطل بين صندوقين نستخدم القنطرة لمعرفة أيهم عنده العطل ولو العطل بين ثلاثة صناديق فإن ذلك يدل على أن العطل فى الصندوق الأوسط ويلزم أيضا التأكد من ذلك بالقنطرة للاطمئنان فقط قبل الحفر .
- 8- أعطال كابلات القدرة يتم تحديدها فى فترة زمنية أقل من أعطال الغلاف أو أعطال الـ Pilot Cable وذلك لأن كابلات القدرة تتحمل الجهود العالية كما أن فرصة سماع مكان العطل فى كابلات القدرة تكون كبيرة .

الباب السادس

دراسات هامة في نظم القوى الكهربائية

هذا الباب يعتبر نسبيا من أصعب أبواب الكتاب ، وفي نفس الوقت - في رأيي الشخصي - من أهم أبواب الكتاب ، فكثر من الظواهر التي تحدث في منظومة القوى نتعامل معها بالحسابات دون أن ندرك أحيانا أسباب نشوئها . على سبيل المثال نعلم جميعا أن هناك ارتفاع في الجهد سيحدث بالشبكة نتيجة دخول المكثفات مثلا ، ونعلم أيضا أن الهبوط في الجهد يمكن أن يؤدي لفصل الشبكة ، لكن السؤال هنا : كيف ولماذا؟

هذا الباب يتعرض لكثير من هذه الظواهر ولاسيما ما نسميه الهزات العابرة (Transients) التي تحدث في منظومة القوى الكهربائية بالشرح والتحليل بكثير من المنطق وقليل من المعادلات قدر الإمكان.

وسلاحظ القارئ لهذا الكتاب أن هذا هو الباب الوحيد الذي تزيد فيه جرعة الحسابات الرياضية عن الأبواب السابقة ، وهذا هو المسلك الأشهر لفهم هذه الظواهر في معظم المراجع ، لكننا نزيد على ذلك هنا في هذا الكتاب استخدام المنطق العقلي والفيزيائي لفهم هذه الظواهر.

والباب مكون من ثلاثة فصول :

- في الفصل الأول من هذا الباب (فصل 28) نتعرض لتفسير العديد من الظواهر العابرة Transients بالمنظومة.
- في الفصل الثاني (فصل 29) ندرس العوامل المؤثرة على استقرار الشبكة الكهربائية Power System Stability نتيجة تعرضها لهذه الهزات وغيرها ، والجزء الأكبر في هذا الفصل سيخصص للحديث عن استقرار الجهد ، حيث هو المشكلة الأبرز في أغلب الدول حاليا.
- في الفصل الثالث (فصل 30) ندرس ظاهرة هامة مؤثرة على أداء المنظومة وهي ظاهرة التوافقيات (Harmonics) .

27

الهزات العابرة في نظم القوى الكهربائية

TRANSIENTS IN POWER SYSTEM

27.1 مقدمة الفصل :

كلنا يستطيع تحليل ودراسة أداء أى دائرة كهربية مغذاة من DC or AC Supply طالما تحقق فى الدائرة شرطان :

- 1- أن تكون قيم عناصر الدائرة $R, L,$ and C ثابتة ولا تتغير .
- 2- أن يكون الجهد المطبق سواء كان DC or AC خلال فترة الدراسة بعيدا عن لحظات إغلاق مفتاح الدائرة . أى أن تكون الدائرة فى حالة Steady State, SS ، حيث يمكن تطبيق قانون أوم وقوانين كيرشوف ونظريات تحليل الدوائر الكهربائية Superposition, Norton, Thevenin, etc بسهولة لحساب قيم الجهد والتيار فى أى جزء من أجزاء الدائرة.

أما فى حالة كون الدائرة تمر بوضع Transient فالأمر مختلف تماما .

بداية فإن كلمة Transient أو بالعربى سنترجمها بالهزة العابرة ، يقابلها كلمة Steady State, SS أو حالة الثبات ، ورغم أنه فى كلا الحالتين فإن الدائرة الكهربائية سيتحكم فى أدائها عناصر الشبكة الثلاثة الرئيسية وهم Resistance, Inductance and Capacitance ، إلا أن القوانين المطبقة فى حالة الـ SS لا يصلح تطبيقها فى حالة الـ Transient لأن استجابة هذه العناصر الثلاثة للـ Transients مختلفة تماما عن استجابتها فى حالة الـ SS ، بل تختلف هذه الاستجابة حسب مدة بقاء الهزات العابرة وشكلها كذلك أثناء فترة الـ Transients.

تعرف معظم الـ Transients بأنها Disturbance تحدث أثناء الانتقال من حالة استقرار إلى حالة استقرار مختلفة وذلك فى مدة - غالبا تكون - أقل من دورة Sub cycle و تؤثر على شكل موجات الجهد والتيار . وإن كان هناك بعض الـ Transients التى قد تدوم دورات كاملة.

معظم الهزات العابرة لا تستطيع أجهزة القياس العادية أن تلاحظها أو تسجلها وذلك لأن الـ Transient قد تكون لمدة 2ms مثلا وبترددات تبدأ من 0.1 Hz وتصل إلى 20kHz ، ومنها ما قد يصل إلى 50MHz في حالة الـ GIS substations ، وهذا يعنى أن جهاز القياس يجب أن يكون له Frequency response سريع جدا حتى يمكنه رصد وتسجيل هذه الهزات بدقة وبالطبع سنحتاج إلى أجهزة خاصة جدا ومكلفة.

27.1.1 مالمقصود بالـ Transient Analysis والـ SS- Analysis؟

ونقصد بها تحليل الظواهر العابرة والظواهر المستقرة ، فالمقصود بالـ Transient Analysis هو دراسة تصرف الدائرة مع الزمن خلال فترة الـ Transients ، حيث تظهر معادلات الجهد والتيار كدالة في الزمن ، فعندها نقول أن هذه المعادلات هي نتاج الـ Transient Analysis . أما إذا كانت المعادلات خالية من عنصر الزمن فهذا يعنى أن الدائرة وصلت إلى حالة الثبات ولم يعد تغير الزمن يؤثر في قيم الجهد ولا التيار (المقصود أن قيم الـ RMS لهما ثابتة) ، وبالتالي تكون المعادلات وقتها نتاج حالة الـ Steady State Analysis .

وعموما عند دراسة أداء أى دائرة كهربية رياضيا فإنه يتم دراستها من خلال معادلات تفاضلية ، ويكون الحل دائما مكون من جزئين : جزء متعلق بحالة الـ transient ، بالإضافة إلى جزء خاص متعلق بحالة الـ SS.

27.1.2 مدى الهزات العابرة

في دراسة مقدمة من (CIGRE (International Council on High Voltage Electrical Systems and International Electro Technical Commission (IEC تم فيها تصنيف مدى الترددات في الهزات العابرة إلى أربع مجموعات :

1. Low-frequency oscillations, from 0.1 Hz to 3 kHz;
2. Slow-front surges, from 50/60 Hz to 20 kHz;
3. Fast-front surges, from 10 kHz to 3 MHz;
4. Very fast-front surges, from 100 kHz to 50 MHz

كما تم تصنيف الترددات حسب سبب حدوثها على النحو التالي :

Origin -----	Frequency Range
Ferro resonance-----	0.1 Hz to 1 kHz
Load rejection -----	0.1 Hz to 3 kHz
Fault clearing-----	50 Hz to 3 kHz
Line switching -----	50 Hz to 20 kHz
Transient recovery voltages -----	50 Hz to 100 kHz
Lightning overvoltage -----	10 kHz to 3 MHz
Disconnecter switching in GIS -----	100 kHz to 50 MHz

27.1.3 لماذا ندرس أداء الشبكات أثناء الـ Transient ؟

حالة الـ Transient ليست كما قد يفهمها البعض على أنها حالات نادرة ، فالحقيقة أن هذه الهزات متكررة طوال اليوم ، فعلى سبيل المثال فإن الـ Transients ستنتج في الأوقات التالية:

- 1- عند فصل وتشغيل أى حمل
- 2- عند حدوث عطل
- 3- عند حدوث تغيير مفاجئ في جهد الدائرة
- 4- عند فصل وتشغيل المكثفات والمحولات والكابلات وكذلك الـ reactors
- 5- عند الإصابة بالصواعق حيث سينتج عنها شكلين من أشكال الهزات :
 - a. Impulse wave وهي uni-direction wave ومدتها تقاس بالميكرو ثانية
 - b. Transient waves ومدتها تقاس بالمللى ثانية
- 6- حالات الرنين وحالات الـ Ferro resonance

وقد يقول قائل : هذه الحالات متكررة لكنها طبقا للتعريف تعتبر حالات لا تبقى زمنيا إلا لأجزاء من الثانية .

فلماذا الاهتمام بظاهرة ستختفى خلال جزء من الثانية؟

والإجابة أنه رغم صغر الفترة التي تحدث فيها الـ Transients إلا أنه قد يترتب على حدوثها انهيار في الشبكة نتيجة حدوث ارتفاعات في الجهد أو التيار خلال هذه المدة الوجيزة لا تتحملها الأجهزة . ومن هنا فكل جهاز أو

معدات كهربائية معرضة لحدوث أى شكل من أشكال الـ Transient فإنه يلزم قبل توصيفها دراسة نتائج حدوث هذه الظواهر وتأثيرها عليها ، وبالتالي تكتب المواصفات وقد أخذنا فى الاعتبار أقصى ارتفاع فى الجهد ومدة بقائه وأقصى تيار وأقصى مدة له وهكذا. ومن هنا مثلا نفهم لماذا توصف وتختبر أجهزة ومعدات مثل القواطع CB والكابلات ليس فقط حسب جهد التشغيل بل أيضا حسب الجهد الدفعى max. Impulse voltage التى تتحملها.

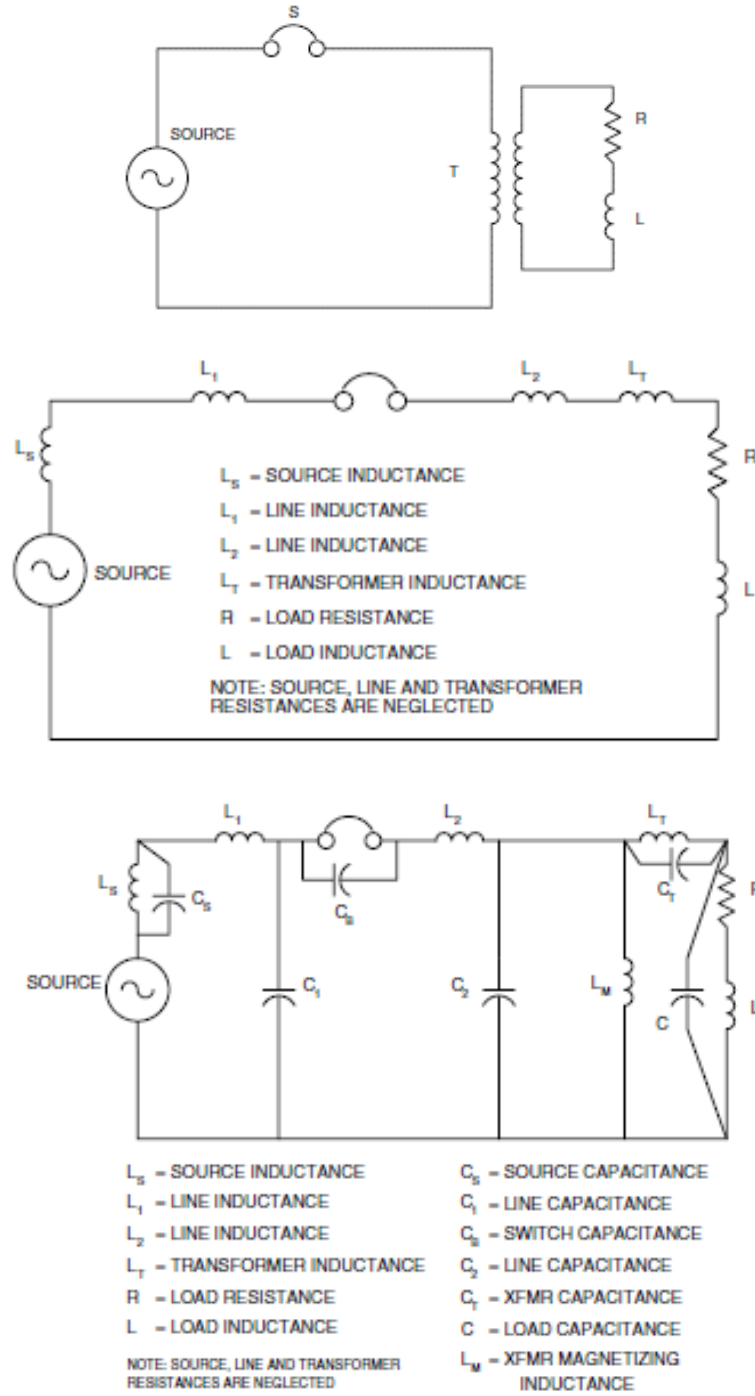
وحتى الهزات التى لا تسبب ارتفاعات كبيرة فى الجهد فإنها تؤثر على أجهزة الوقاية مما يؤدى إلى خروج أحمال هامة بسبب هذه الهزات وبالتالي نتكبد خسائر ضخمة ، ففى مصانع الأسمنت مثلا عند حدوث هزات كهربائية فإن الأحمال التى تعتمد على التردد مثل الـ (Drives) تخرج من الخدمة وتكلف المصنع خسائر كبيرة نتيجة تعطل المادة الخام وتلفها.

وأحيانا يطلق على هذه الـ Transients مصطلحات عامة من قبيل Impulse, Spike, surge, pulse وغيرها و لابد من تحديد واضح لمعنى كل لفظ من هذه الألفاظ والتى عموما يمكن أن نسميها Transients.

تأثير الـ Transient يمكن أن يسبب مشاكل لكل معدات الـ Power system بما فيها المعدات الأساسية مثل المحولات والمحركات ، وذلك رغم كونها تحتوى على Inductance عالية تستطيع أن تنشأ Damping للترددات العالية بسهولة لكنها قد تتأثر بالجهود العالية ، لكن المشكلة ستكون أكثر تعقيدا مع المعدات الإلكترونية الحساسة أو معدات التحكم عموما فى منظومة الـ Power System .

27.1.4 كيف يتم تمثيل المعدات أثناء الـ Transients؟

والشكل 1-28 يعطى نموذج شكلى لتوضيح ماسبق حيث يظهر جزءا من منظومة الـ power system فى الجزء الأول من الرسم ثم يظهر فى الجزء الثانى كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ SS ، وأخيرا كيف يتم تمثيلها فى حالة الـ Transient.



تمثيل أجزاء من منظومة القوى في الظروف العادية وفي حالة الهزات العابرة Figure 27-1

لاحظ كيف أن حالة الـ transient تأخذ في الاعتبار كل المركبات مهما صغرت قيمتها بسبب ارتفاع قيمة التردد عند حالات الـ Transient بينما يتم إهمال قيم مكثفات كثيرة في حالة الـ SS .

27.1.5 تحرير المصطلحات

الهزات العابرة تحدث سواء كانت الدائرة الكهربائية مغذاة من DC Supply أو كانت مغذاة من AC Supply ، وبعض المراجع تستخدم مصطلحات أخرى من قبيل مصطلح AC analysis and DC analysis .

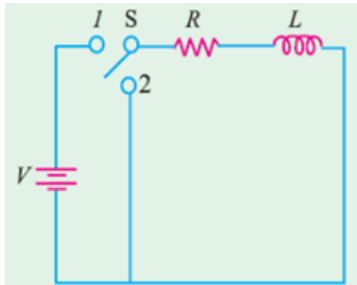


Figure 27-2

عموماً ، يقصد بالـ DC analysis أن ندرس تصرف الدائرة إذا تم غلقها بدون وجود أى voltage source كأن تضع الـ Switch فى الوضع 2 فى الشكل 2-28 ، أو ندرس تصرفها فى بداية وضع مصدر ثابت للجهد مثل البطارية.

أما مصطلح الـ AC analysis فغالبا يقصد به دراسة Frequency response للدائرة ، بمعنى آخر ما هو تصرف الدائرة إذا مر بها تيارات ذات ترددات مختلفة ، ولذا توضع النتائج بين محورين : الأفقى هو التردد والرأسى هو الـ Magnitude سواء كان جهداً أو تياراً ومنه تعرف هل هذه الدائرة مثلاً حساسة للترددات العالية أم المنخفضة أم لا تتأثر وهكذا.

ملحوظة:

قد يسأل سائل : ولماذا الاهتمام بموضوع الـ DC ونحن كافة تعاملتنا تكون بالـ AC ؟

والإجابة أن هناك أهمية قصوى لدراسة تأثير النظام بجهد DC لأنه ورغم أن المصدر الرئيسى للتغذية هو الـ AC Supply إلا أن الـ DC Signals موجودة بكثرة ، على سبيل المثال :

- 1- جميع الدوائر التى تحتوى على Capacitance and Inductance يمر بها عند بدء التشغيل تيار مكون من جزئين : الأول يسمى DC Component والثانى يسمى SS Current ، وبالتالي فوجود الـ DC لا يقتصر فقط على الدوائر التى تتغذى من DC Source .
- 2- عند بدء تشغيل المحولات فإنها تسحب تيار الاندفاع Inrush current ، وهذا التيار مكون من جزئين DC and AC ، وبالتالي فعند دراسة تصرف أى دائرة circuit response أثناء مرور هذا التيار سنحتاج أن ندرسها بطريقة الـ Super Position حيث ندرس تأثير الدائرة بالجزء الـ DC فقط كما لو كان موجوداً منفرداً ، ثم ندرس تأثيرها (circuit response) بالجزء الـ AC كما لو كان منفرداً . ويكون الـ circuit response تجاه الـ Inrush current هم مجموع الاثنين . ما يهمنا فى هذا المثال هو التأكيد على أننا نحتاج إلى دراسة أداء الدائرة فى وجود DC source .
- 3- مثال آخر عند اصطدام صاعقة برقية بالمنظومة فكأننا وضعنا DC Supply على الدائرة ولا تنس أننا ندرس تأثير الـ Transient .

27.1.6 مصدر تغذية الهزات العابرة

من المهم جدا أن نعرف أن التيارات خلال فترة الـ Transient لا يكون مصدرها هو مصدر الطاقة الأساسي الذي يغذى الدائرة (بطارية مثلا أو مولد فهذه المصادر مسئولة فقط عن مرور التيار في حالة الـ SS) ، أما مصدر تغذية تيارات الـ Transient فهي عملية تبادل الطاقة المخزنة في الملفات والمكثفات ، بمعنى آخر لو وجدت دائرة ليس بها أى مكثفات أو ملفات فهذا يعنى بالضرورة أن الدائرة لن تتعرض لأي Transient Condition. وذلك لأن الـ L and C يمثلان العناصر القادرة على تخزين الطاقة وبالتالي يعزى إليهما المسؤولية عن نشوء حالة الـ Transient ، أما المقاومة فهي العنصر المسئول عن تبديد الطاقة وليس تخزينها ولذا يعزى إليها المسؤولية عن إخماد الـ Transient.

كما أن طول و قصر مدة الـ Transient ستوقف أساسا على قيم الـ L, R and C حسب ما يسمى بالـ Time Constant كما سنرى.

27.1.7 الأنواع المختلفة من الهزات العابرة

هذا الفصل مقسم إلى ثلاثة أقسام:

فى القسم الأول : سنرى أن مجرد توصيل المصدر أيا كان نوعه AC or DC على دائرة بها ملفات أو مكثفات يعنى أن لدينا حالة من الهزات العابرة ، ليس بالضرورة أن تكون مصحوبة بارتفاع كبير فى الجهد أو التيار ، وإنما يمكن أن تتسبب فقط فى تغير فى شكل موجة الجهد والتيار فى اللحظات الأولى من توصيل المصدر وبعدها تصل الدائرة إلى حالة الثبات أو مانسميها بالـ SS. وسندرس فى هذا القسم نوعين من هذه الهزات:

- الهزات العابرة نتيجة توصيل DC Supply على الدائرة
- الهزات العابرة نتيجة توصيل AC Supply على الدائرة

وفى القسم الثانى من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها ليس مجرد تغير فى شكل الموجة وإنما تغير كبير فى قيمتها ، وتحديدا سندرس الحالات المسببة لارتفاع فى الجهد ، وغالبا تدرس فى المراجع تحت عنوان الـ Voltage surges ، أو تمورات الجهد وتشمل ارتفاع الجهد فى الحالات التالية:

4. عند الإصابة بالصواعق البرقية
5. عند لحظات حدوث / فصل الأعطال
6. عند فصل وتشغيل المكثفات
7. عند فصل وتشغيل أحمال لاسيما المحركات الكبيرة
8. عند فصل وتوصيل المحولات

ويمكن تصنيف الحالات السابقة بطريقة أخرى حسب المدة الزمنية لبقائها ، حيث يمكن القول بأن الارتفاعات التي تحدث في قيمة الجهد يمكن تقسيمها إلى ثلاث مجموعات هي : الارتفاع الدائم Over Voltages ، والارتفاع العارض Voltage Swell ، و الارتفاع الخاطف Impulse surges .

وفي القسم الثالث من هذا الفصل : ندرس حالات من الهزات العابرة ينشأ عنها انخفاض في الجهد Voltage drop (عكس القسم الثاني) . وهذا الهبوط في الجهد قد يكون دائما ومستمرًا مثل حالات:

- i. تيار البدء المرتفع في المحركات
- ii. الهبوط في جهد على الكابلات نتيجة التحميل الزائد
- iii. الهبوط في الجهد بسبب المحولات

وقد يكون مؤقتًا وخاطفاً مثل :

- iv. الهبوط في الجهد نتيجة تيار القصر
- v. الهبوط الخاطف المسبب لحدوث Voltage Sags

علما بأنه قد تحدث للجهد أيضا حالة من عدم الاستقرار Voltage Instability وهذه تدرس في الفصل التاسع والعشرون ، حيث أنه الفصل المعنى بدراسة موضوع الـ Stability عموما.

ومما سبق يتضح أن التغيرات في الجهد سواء بالارتفاع أو الانخفاض تصنف حسب مدة دوام هذا التغير. والجدول 1-28 يلخص القيم القياسية لكل ظاهرة من الظواهر السابقة طبقا للمواصفة العالمية IEEE 1159:

Table 27-1

IEEE1159-EN50160 Levels					
IEEE 1159					EN50160
No.	Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude	
	Short Duration Variations				
	Instantaneous				
7	Sag		0.5-30 Cycles	0.1-0.9 pu	<1 sec
8	Swell		0.5-30 Cycles	1.1-1.8 pu	No
	Momentary				
9	Interruption		0.5 Cycles-3s	<0.1 pu	<1 sec
10	Sag		30 Cycles-3s	0.1-0.9 pu	No
11	Swell		30 Cycles-3s	1.1-1.4 pu	No
	Temporary				
12	Interruption		3 s-1 min	<0.1 pu	No
13	Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu	No
14	Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu	No
	Long Duration Variations				
15	Interruption, Sustained		>1 min	0.0 pu	Yes
16	Undervoltages		>1 min	0.8-0.9 pu	Yes 10 min
17	Overvoltages		>1 min	1.1-1.2 pu	Yes 10 min

وسنبدأ فيما يلي عرض الأقسام الثلاثة السابقة بالتفصيل .

القسم الأول من أنواع الهزات العابرة:

الهزات العابرة المسببة لتغير في شكل الموجة

سنلاحظ في هذا القسم أن الهزات العابرة فيه تسبب تغيير طفيفا في شكل وقيمة الموجة ، على عكس الهزات التي ستدرس في القسم الثاني والثالث والتي تحدث تغيير كبيرا في قيمة الموجة سواء بالارتفاع كما في القسم الثاني أو بالانخفاض كما في القسم الثالث.

27.2 الهزات عند تطبيق DC Supply على دائرة بها مكثف ومقاومة

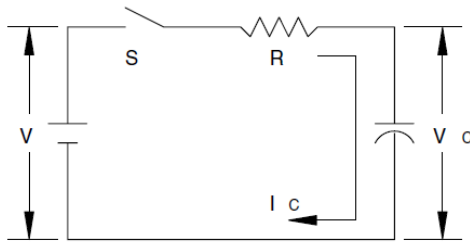


Figure 27-3

في هذه الحالة (شكل 28-3) ستزايد قيمة الجهد على المكثف من صفر حتى تصل إلى V ، بينما ستتناقص قيمة تيار شحن المكثف من قيمة عظمى هي V/R وذلك عند لحظة البدء ثم يتناقص Exponentially حتى يصل إلى الصفر حين يتم شحن المكثف تماما.

وستكون قيمة الجهد على المكثف وكذلك التيار المار خلال المكثف تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن المكثف كان غير مشحون عند البدء)

$$V_C = V(1 - e^{-t/RC})$$

$$I_C = (V/R)e^{-t/RC}$$

$$RC = \lambda$$

وكما تلاحظ من الشكل 28-4 ، فإن الجهد مكون من جزئين :

الجزء الأول هو الخاص بالـ SS

والجزء الثاني وهو الجزء الـ Exponentially ، وهو ما يمثل جزء الـ Transient .

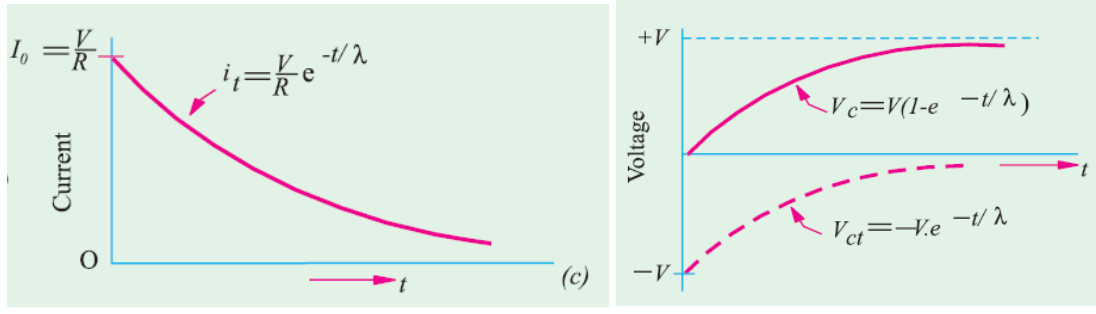


Figure 27-4

والـ Time Constant يقاس بالثانية هو الثابت الذي يساوى RC فى معادلة الجزء الخاص بالـ Transient ، ويرمز له بالرمز λ ، ويمثل الزمن الذى تستغرقه Exponential curve ليصل إلى 36% من قيمته الأصلية (تساوى بالضبط e^{-1}). فإذا وصلت قيمة الزمن (t) إلى ضعف الـ Time Constant فستصل قيمة التيار إلى 13% (e^{-2}) بينما ستكون القيمة بعد مرور خمسة أمثال الـ TC مثلاً قد تلاشت تقريباً كما فى حالة تيار شحن المكثف المرسوم هنا. وهو ما حدث أيضاً مع الجزء الخاص بالـ Transient فى إشارة الجهد حيث تلاشت مع الوقت ولم يتبقى سوى الجزء الخاص بالـ SS ويساوى V.

27.2.1 مفهوم الـ Time Constant, TC

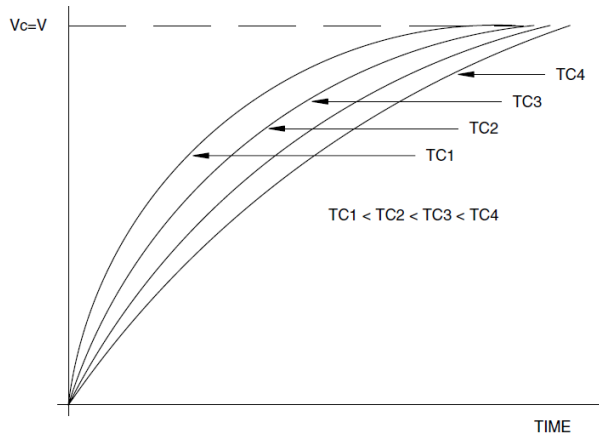


Figure 27-5 Different Time constant

يعتبر الـ TC مقياساً لمدى سرعة استرجاع النظام لعافيته بعد تأثره بتهزة معينة . فكلما زادت قيمة المكثف أو المقاومة كلما كانت النظام بطيئاً فى استجابته كما فى الشكل 28-5.

27.3 الهزات عند تطبيق DC Supply على دائرة بها ملف ومقاومة

فى هذه الحالة (شكل 28-6) ستكون قيمة تيار الملف والجهد تحكمه المعادلات التالية (بفرض أن التيار بالملف كان صفراً عند البدء) :

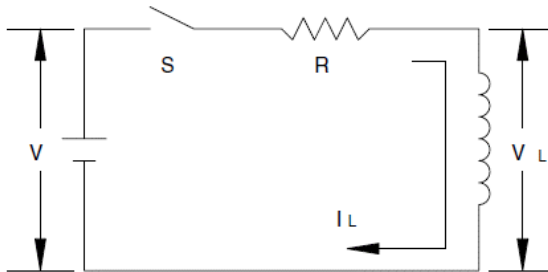


Figure 27-6

$$V_L = Ve^{-tR/L}$$

$$I_L = (V/R)(1 - e^{-tR/L})$$

$$L/R = \lambda$$

لاحظ هنا أن قيمة الـ Time Constant فى

حالة الـ R-L Circuit يساوى L/R ويرمز له

بالرمز λ (تذكر أنه فى حالة R-C Circuit

كان يساوى RC) ، وبالتالي فكلما زادت قيمة الملف أو قلت قيمة المقاومة كلما كانت النظام بطيئاً فى استجابته.

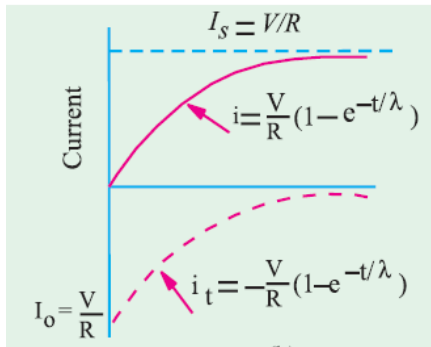


Figure 27-7

تذكر هنا لماذا نهتم بمعرفة قيمة الـ X/R ratio الخاصة بأى

شبكة ، فالآن نفهم أن هذه النسبة تمثل الـ Time Constant

الخاص بالدائرة والذي يعبر عن مدى سرعة وصول الشبكة

لحالة الـ SS .

لاحظ أن التيار كما ذكرنا سابقاً مكون من جزئين أحدهما وهو

الخاص بالـ Transient سيختفى بعد مرور فترة زمنية تعادل

عدد معين من مضاعفات الـ Time Constant ولذا قد تطول

أو تقصر حسب قيمة الـ TC والذي تتحكم الـ R and L فى قيمته .

لاحظ أنه لو أغلقت الدائرة على الوضع رقم 2 فى الشكل 28-8 فإن التيار لن يكون هناك له source ليستمر

خلال الـ SS ، ومن ثم لن يكون لدينا سوى تيار واحد فقط هو تيار الـ Transient الذى يبدأ من قيمة عظمى

وينتهى للصفر .

تذكر الملحوظة الهامة أن تيار الـ Transient ليس له Source سوى الطاقة المخزنة فى الملف أو المكثف والتي

سرعان ما تنتهى وينتهى معها حالة الـ Transient كما فى الشكل .

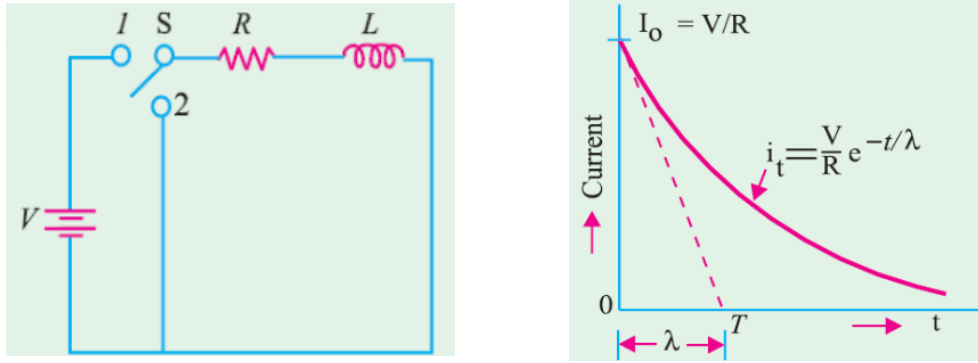


Figure 27-8

Example 22.2. A circuit of resistance $10\ \Omega$ and inductance $0.1\ H$ in series has a direct voltage of $200\ V$ suddenly applied to it. Find the voltage drop across the inductance at the instant of switching on and at 0.01 second. Find also the flux-linkages at these instants.

(Basic Electricity, Bombay Univ.)

Solution. (i) Switching instant

At the instant of switching on, $i = 0$, so that $iR = 0$ hence all applied voltage must drop across the inductance only. Therefore, voltage drop across inductance = **200 V**.

Since at this instant $i = 0$, there are no flux-linkages of the coil.

(ii) When $t = 0.01$ second

As time passes, current grows so that the applied voltage is partly dropped across the resistance and partly across the coil. Let us first find iR drop for which purpose, we need the value of i at $t = 0.01$ second.

Now, time period of the circuit is $\lambda = L/R = 0.1/10 = 0.01$ second. Since the given time happens to be equal to time constant,

$$\therefore i = (200/10) \times 0.632 = 12.64\ A; \quad iR = 12.64 \times 10 = \mathbf{126.4\ V}$$

$$\text{Drop across inductance} = \sqrt{200^2 - 126.4^2} = \mathbf{155\ V}$$

$$\text{Now,} \quad L = N\Phi / i \quad \text{or} \quad N\Phi = Li$$

$$\therefore \text{Flux-linkages } Li = 0.1 \times 12.64 = \mathbf{1.264\ Wb\text{-turns.}}$$

27.4 الهزات عند تطبيق AC Supply على دائرة بها ملف ومقاومة

لو فرضنا أن لدينا AC Source له جهد قيمته تساوى $v = V_m \sin(\omega t + \phi)$ وتم وضعه فجأة على دائرة

بها $R+L$ ، ففي هذه الحالة سيمر كما انتقنا تيار مكون من جزئين : SS + Transient أو

$$I = I_s + I_t$$

فأما الجزء الخاص بال SS فيحسب طبقاً لقواعد الـ Circuits العادية ويساوى

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{V_m}{Z}$$

وتكون صورته النهائية هي

$$i_s = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi)$$

طبقا لقواعد الـ Circuits العادية حيث ϕ هي الزاوية التي يتأخر بها التيار عن الجهد وتساوى $\tan^{-1} X_L/R$

أما الزاوية Ψ فتمثل الزاوية التي تصادف أن تم غلق الدائرة عندها وقد تكون أى قيمة عشوائية لأنك لا تتحكم فى لحظة غلق الدائرة بدقة .

أما جزء الـ Transient فكما اتفقنا سابقا يكون فى حالة دوائر الـ R-L مكونا من جزء متناقص Exponentially بقيمة عظمى هي I_0 . و يكون التيار الكلى هو مجموع الجزئين الثابت والمؤقت

$$i_t = I_0 e^{-t/\lambda} \quad \therefore i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) + I_0 e^{-t/\lambda}$$

وللحصول على قيمة I_0 فى دوائر الـ AC نستخدم الشروط التى تصف حالة بدء الدائرة عند $t=0$ فلو فرضنا أنه عند $t=0$ كانت $i=0$ سنحصل على قيمة I_0 كما فى المعادلات التالية:

$$0 = I_m \sin(\Psi - \phi) + I_0 \quad \therefore I_0 = -I_m \sin(\Psi - \phi)$$

من الواضح أن قيمة I_0 تتوقف على قيمة الزاوية Ψ وهذا يعنى أن القيمة العظمى لجزء الـ Transient تتوقف على توقيت لحظة غلق الدائرة وهل كانت مثلا عند زاوية تساوى صفرا أم تساوى 90 أو قيمة بينهما. وهذا هو السبب الذى يجعل من يدرس قيمة تيار العطل عند الحالات المختلفة يقوم بدراسة الأعطال عند لحظات مختلفة من الـ sin wave ، والسبب كما ذكرنا أن قيمة تيار الـ Transient يتأثر بشدة بلحظة حدوث العطل.

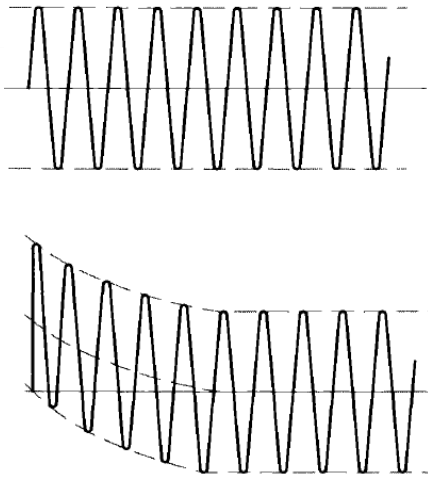


Figure 27-9 DC Component

وعموماً فإن المعادلة العامة للتيار في النهاية ستساوي

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi - \phi) - I_m \sin(\Psi - \phi) e^{-t/\lambda}$$

لاحظ أنه عند $t=0$ لو كانت $\Psi = \phi$ فعندئذ ستكون $i_0 = 0$

صفر بمعنى أننا لن يكون لدينا جزء Transient كما في

الجزء الأول من الشكل 28-9 ، بينما يكون الجزء الخاص بالـ

Transient في أقصاه عندما تكون $\Psi - \phi = \pi/2$.

القسم الثاني من أنواع الهزات العابرة

الهزات العابرة المسببة لارتفاع فى الجهد

الهزات العابرة ، أو الـ Transients ، المسببة لارتفاع فى الجهد تتشابه جميعها فى أنها تحدث لمدة وجيزة جدا. ورغم أن تأثيرها يظهر فى إشارتى الجهد والتيار إلا أنه قد تم التعارف على تسميتها بالـ (Voltage Surges) ، أو الارتفاعات الحادة فى الجهد لأنها تكون غالبا أكثر وضوحا فى إشارة الجهد. وبعض المراجع العربية تستخدم مصطلح "تمورات الجهد" للتعبير عن هذه الظواهر.

27.5 ظاهرة ارتفاع الجهد

وهناك أسباب متعددة لحدوث هذه الهزات فى منظومة القوى منها :

- 1- ما ينشأ بسبب ظروف جوية طارئة ، والحالة الأشهر هنا هى حالة الإصابة بالصواعق البرقية.
- 2- وقد تحدث هذه الـ Surges نتيجة لظروف التشغيل ، حيث تتولد نبضات جهد عالى بتردد يصل إلى عدة مئات من kHz ، كما فى الحالات التالية :

- أ- عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)
- ب- عند فصل وتشغيل المكثفات
- ت- عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة
- ث- عند فصل وتوصيل المحولات

ويمكن بصورة عامة أن نقول أن فصل وتشغيل أى معدات تحتوى على ملفات أو مكثفات ستسبب فى حدوث Voltage Surges ، كما ذكرنا فى المقدمة لهذا الفصل.

- 3- وهناك سبب ثالث لحدوث هذه الـ Surges وهو تفريغ الشحنات الاستاتيكية ، فكما نعلم جميعا فمجرد أن يمشى إنسان على موكيت أو سجادة مثلا فسيتراكم على جسمه كمية الشحنات ترفع قيمة جهد الجسم إلى قيم قد تصل إلى 15 kV (ويصبح الجسم كأنه مكثف مشحون) فإذا تلامس مع جسم له جهد أقل فسيحدث تفريغ Discharge للشحنة وتمر طاقة كهربية قد تكون كافية لتدمير على الأقل بعض المعدات الإلكترونية التى قد يلمسها ، ولذا تتخذ إجراءات صارمة بالنسبة للأشخاص الذين يتداولون هذه المعدات من ضمنها ضرورة أن يلبس سوار مؤرض فى معصمه أو تكون الأرضية من مادة Anti-static إلخ.

4- ومن الأسباب الأخرى حدوث قطع فى الموصلات أو انهيار فى العازل مما يتسبب فى حدوث ظاهرة الـ Ferro resonance مع ملاحظة أن التردد فى هذه الحالة الأخيرة لا يكون مرتفعاً بل نفس تردد الشبكة.

27.5.1 طبيعة الـ Voltage surges

هى نبضات أو ارتفاعات حادة فى الجهد تحدث بمعدل سريع جداً ، وبالتبعية ستتسبب فى ارتفاعات حادة فى التيار أيضاً . و هذه الـ Surge عبارة عن طاقة كهربية هائلة ذات جهد يصل فى حالة الصواعق البرقية مثلاً إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذى يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، كما يصل فى الحالات الأخرى إلى عدة آلاف من الفولت . ويتوقف مدى تأثير هذه الـ Surges على عدة عوامل منها:

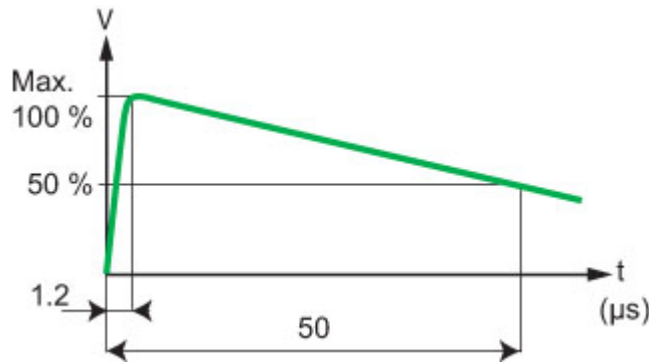


Figure 27-10 Impulse Wave

1. زمن الارتفاع Rise Time ، وهو الزمن الذى تستغرقه موجة الجهد للوصول للقيمة العظمى ، وغالباً لا يتجاوز $1-2\mu s$ ، (1.2 فى الشكل 10-28).

2. زمن دوام الموجة ، وغالباً لا يتجاوز $50-100\mu s$ ، وبعده

يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما فى الشكل 10-28 الذى يظهر الشكل التقليدى للـ Voltage surge/ Impulse Wave (ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير $1.2 \times 50\mu s$. وتسمى هذه الموجة بالموجة الكاملة كما ستظهر فى جداول اختيار الجهود الدفعية Impulse voltage للمعدات لاحقاً.

3. معدل الارتفاع Gradient ويقاس بالـ kV لكل ميكرو ثانية.

وهذه القيم الثلاثة تحدد مدى تأثير الـ Surge على المعدات ، وبالتالي فعوازل المعدات لابد أن تتحمل هذه الجهود المتوقعة. ومن هنا ظهرت أهمية تحديد مصطلح الـ Basic Insulation Level, BIL فى المقطع التالى.

27.5.2 ماذا نقصد بـ Basic Impulse level (BIL)

يجب دائماً توصيف الأجهزة المعرضة لمثل هذه الارتفاعات الهائلة بالجهد بحيث تكون قادرة على تحملها ، ولذا نحتاج إلى عمل اختبارات لقياس ما يعرف بالـ BIL ، وهى تمثل القيمة القصوى للـ Surge التى تتحملها

المعدات الكهربائية ، فالمحولات الكهربائية على سبيل المثال يجب أن تتحمل عوازلها مثل هذا الارتفاع المفاجئ

Table 27-2

BASIC INSULATION LEVEL AS PER IS (2165 – 1962)

Nominal system volt kV (rms)	Highest system volt kV (rms)	Impulse withstand volt kVp for test		One minute power frequent volt kV (rms)	
		Full insulation	Reduced insulation	Full insulation	Reduced insulation
132 kV	145	650	550	275	230
220 kV	245	1050	900	460	395
400 kV	420		1550		680
			1425		630
Reduced insulation is used where system is effectively earthed.					

في الجهد نتيجة للصواعق أو أي مصدر

داخلي من مصادر ارتفاع الجهد المفاجئ

كعمليات الفصل والتوصيل على المحول أو

المكثفات بالشبكة.

فإذا كان المحول موصلًا بكابلات في ناحيتي

الجهد العالي والجهد المنخفض فإن احتمال

تعرضه لموجة Surge Voltage ناتجة عن

صاعقة أو عوامل خارجية يكون ضئيلاً جداً

نظراً لأن الكابلات لها قدرة أكبر من الخطوط

الهوائية على تقليل شدة موجة الجهد الدفعية. أما إذا كان المحول موصلًا بخط هوائي فيجب استخدام مانعة

صواعق لحماية المحول ، وفي هذه الحالة يسمح بخفض قدرة عزل المحول المطلوبة . ويجب أن توضع مانعة

الصواعق بحيث تكون أقرب ما يمكن من المحول.

ورغم أن احتمال تعرض المحول المتصل بكابلات للـ Surge العالية نتيجة البرق ضئيلاً إلا أن المواصفات على

سبيل المثال (NEC article 280) تلزم بوضع Surge arrester ، لكن ليس لمنع تأثير البرق بل لمواجهة

تأثير الجهود الخاطفة التي يمكن أن تصل للمحول نتيجة الـ Switching مثلاً.

والجدول 28-3 يعطى القيم المستخدمة في الشبكة المصرية لتوصيف تحمل المعدات للجهود العالية في شبكات

الجهود المختلفة (راجع مصطلح الموجة الكاملة في المقطع السابق):

Table 27-3 توصيف المعدات حسب تحملها للجهود الدفعية

جهد التحمل بتردد المنظومة لدقيقة واحدة KV rms	جهد التحمل الدفعي بموجة كاملة KV peak	الجهد الأقصى KV _m rms	الجهد المقنن KV _n rms
٣٨	٧٥	١٢	١١
٥٠	١٢٥	٢٤	٢٢
٧٥	١٧٠	٣٦	٣٣
١٤٠	٣٢٥	٧٢,٥	٦٦
٢٣٠	٥٥٠	١٢٣	١١٠
٢٧٥	٦٥٠	١٤٥	١٣٢
٤٦٠	١٠٥٠	٢٤٥	٢٢٠
٦٨٠	١٥٥٠	٥٥٠	٥٠٠

وفيما يلي سندرس بالتفصيل الحالات المختلفة للتهزات العابرة المسببة للارتفاع في الجهد وتحديداً :

1. حالة الإصابة بالصواعق البرقية.
2. عند لحظات حدوث / فصل الأعطال (فصل وتشغيل القواطع)
3. عند فصل وتشغيل المكثفات
4. عند فصل وتشغيل بعض الأحمال لاسيما المحركات الكبيرة
5. حالات الـ Ferro resonance

27.6 الهزات العابرة الناتجة عن الصواعق البرقية LIGHTNING

27.6.1 ما هو البرق؟

البرق يمثل تعبيراً مرئياً عن كمية هائلة من الطاقة الكهربائية المحمولة على السحب. وأغلب النظريات تفسر تراكم

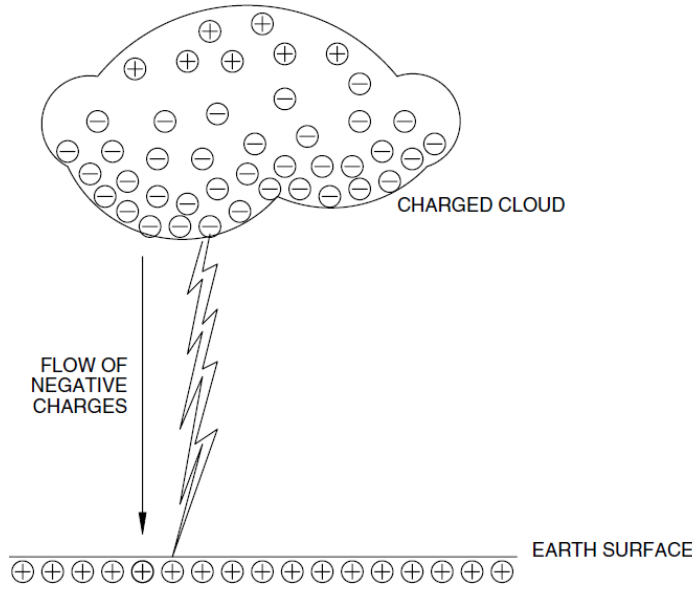


Figure 27-11 الشحنات بالسحابة

هذه الشحنات ونشوءها بحدوث احتكاك بين تيارات الهواء وبين الرطوبة وذرات الغبار الموجودة في السحابة ، مما يترتب عليه ظهور كميات هائلة من الشحنات الاستاتيكية السالبة على الجزء السفلي من السحابة ، بينما تتراكم شحنات موجبة في أعلى السحابة ، ويجذب المجال الكهربى السالب فى أسفل السحابة الشحنات الموجبة فى الأرض فتظهر شحنات موجبة على الأسطح (شكل 28-11) لاسيما على المباني العالية المقابلة للسحابة ، وهذا يعنى أن الهواء بين السحابة والمبنى قد

أصبح يمثل مكثف هوائى مشحون ، فإذا زاد فرق الجهد بين طرفى هذا "المكثف" الافتراضى عن جهد الانهيار للهواء ($3 \times 10^6 \text{ V/m} = 30 \text{ kV/cm}$) فسيحدث تفريغ للشحنة على صورة شرارة بين السحابة والمبنى .

فعليا يبدأ الهواء المجاور للسحابة فى التأين بتأثير الشحنة الهائلة بالسحابة ويتكون ما يعرف بالـ Leader Streamer كما فى الشكل 28-12 ويبدأ هذا الخيط الرفيع المتأين من الهواء فى التمدد طالما السحابة لاتزال

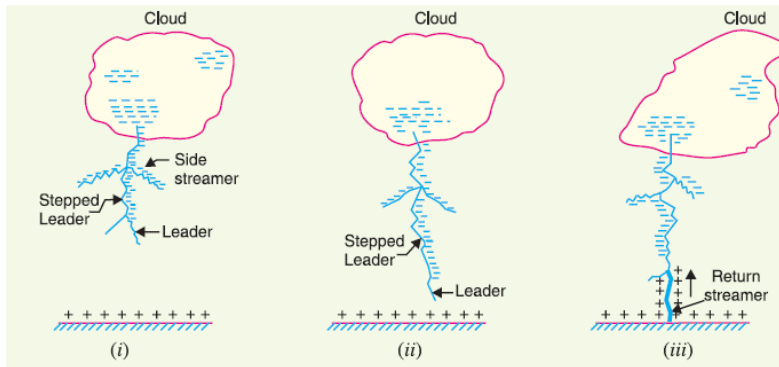


Figure 27-12 مراحل تطور البرق

قادرة على أن تمده بالشحنات مكونا مسار موصلا للتيار حتى يقترب من الأرض وعندما يلامس الأرض أو أى جسم فيها تنتقل الشحنات الموجبة التى كانت مقيدة على الأرض لتسلك نفس الطريق الذى صنعه الـ Leader Streamer

مرتفعة للأعلى ويحدث تفريغ هائل نتيجة اتصال الشحنات الموجبة من الأرض بالسالبة فى السحابة ويحدث الشرارة العظيمة التى نسميها بالبرق.

و هذه الشرارة عبارة عن طاقة كهربية هائلة ذات جهد يصل إلى عدة ملايين من الـ V ، والتيار الذى يمر خلال البرق قد يصل إلى 200 kA بمتوسط قدره 40 kA ، وأهم ما يميزها هو سرعة بناء شكل موجة الجهد ، ففي فترة لا تتجاوز $1-2\mu s$ يكون الجهد قد وصل إلى قيمته القصوى ، ثم فيما لا يتجاوز $50-100\mu s$ يكون الجهد قد فقد 50% من قيمته كما فى الشكل الموجود فى مقدمة الفصل الذى يظهر الشكل 10-28 للـ Voltage Surge/ Impulse Wave التى تتولد نتيجة الصاعقة. (ومن ثم يمكن أن نفهم معنى هذا التعبير $1.2 \times 50\mu s$).

27.6.2 تأثير جهود الأجسام بالبرق

رغم قصر مدة التفريغ إلا أنها تكون كافية لانهايار العزل لأي من الموصلات على الأرض إذا وصلت الصاعقة إليه. الصواعق هي مصدر قوي للتغير المتسارع في الجهد الكهربائي "impulse transient" و ينتج عن ذلك مرور تيار هذه الصواعق إلى الأحمال الكهربائية و يؤدي إلى حدوث زيادة في الجهد كبيرة .

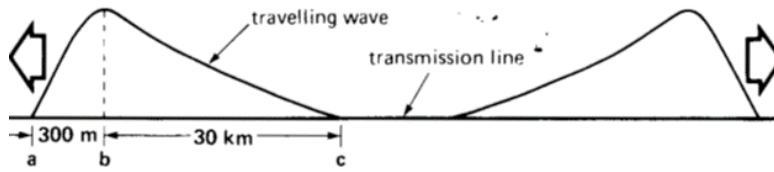


Figure 27-13 Traveling Wave

بصفة عامة ينشأ عن اصطدام صاعقة البرق بالخط ارتفاع لحظى حاد فى جهد نقطة الاصطدام مما ينشأ عنه تولد Travelling Wave ترحل يمينا ويسارا على الخط (شكل 13-28) حتى تصل إلى نهاية

الخط من الجهتين حاملة معها شحنة طاقة هائلة ثم تنعكس هذه الموجات عند محطات نهاية الخط ، وتكرر العملية حتى تفقد الموجة قوتها نتيجة استنفاد طاقتها فى مقاومة الخط الأومية.

ويتميز هذا النوع من الصواعق المباشرة Direct Strokes بارتفاع حاد فى الجهد يصل إلى مليون فولت/ميكروثانية بالإضافة إلى قيمة تيار عالية تصل إلى 200 ك أمبير ، فإذا لم يتم تفريغ هذه الشحنات قبل وصولها لملفات المحولات والأحمال فإنها يمكن أن تدمر كل شئ.

كما أن هذه الطاقة الهائلة الزاحفة على الخط تتسبب فى عمل قوس كهربى Electric Arc على عوازل الأبراج أثناء زحفها على الخط لاسيما على سلاسل العوازل القريبة من نقطة الاصطدام ، لكن لحسن الحظ فإن طاقة الصاعقة تضعف كلما تحركت لمسافة أطول بسبب استهلاك الطاقة خلال مقاومة الخط ويسبب حدوث تفريغات خلال الـ Arc Gaps المركبة على سلاسل العوازل (راجع الباب الثانى من هذا الكتاب).

وعندما تصل الصاعقة إلى المحول فإن المحول يقوم بدور فعال جدا في مواجهتها ، فرغم أننا نعلم أن المحول ينقل الجهد من الجانب الابتدائي للثانوي حسب الـ Turns Ratio إلا أن هذا الكلام صحيح فقط في مدى الترددات المنخفضة ، أما في حالة وجود ترددات عالية فإن المحول سيمثل معاوقة عالية جدا $X_L = 2 \pi f L$ بسبب التردد العالي. ومن ثم فلن تستطيع الصاعقة الانتقال للجانب الثانوي من خلال الحث المغناطيسي مثلما يحدث في المحول مع الجهد العادي .

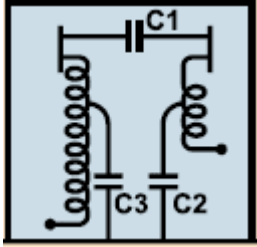


Figure 27-14

لكنها للأسف قد تستطيع الوصول للجانب الثانوي من خلال الـ coupling capacitor, C1 بين الملفات شكل 28-14 ، والتي تقدم مسارا بديلا للموجات ذات التردد العالي و هذا يؤدي إلى زيادة الجهد الكهربائي في الجانب الثانوي من المحول بقيمة أكبر حتى من التي كانت المتوقعة من نسبة عدد اللفات " turns ratio" ما لم تحل هذه المشكلة بطريقة ما.

كما يوجد طرق أخرى لعبور تيار الصواعق إلى الجهة الأخرى عبر موصل الأرضي " ground conductor path" فهناك عدد من الممرات التي من الممكن أن يدخل عن طريقها تيار الصواعق إلى نظام التأريض و هو موضح في الشكل 28-15 عن طريق عدد من الخطوط المنقطعة " dotted lines".

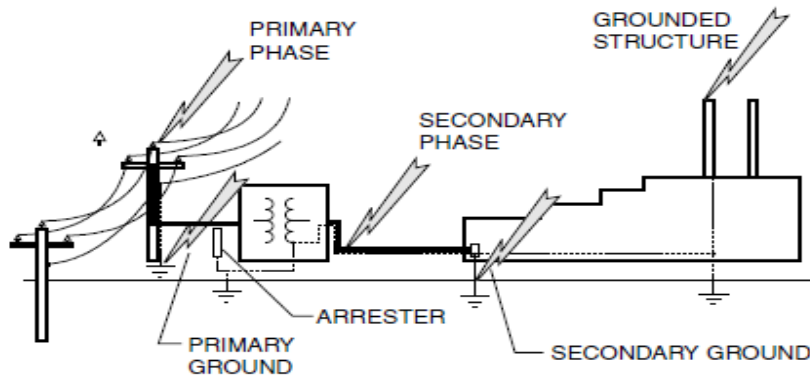


Figure 27-15 تسرب تيار الصاعقة عبر الأرضي

وبالطبع فمن أهم مشاكل الصواعق أنها ترفع الجهد إلى قيم مدمرة على كافة الأجهزة التي تقع في طريقها حتى مكان تفريق الشحنات . كما قد يرتفع الجهد على موصلات منظومة التأريض إلى عدة آلاف من الفولت ، الأمر الذي يؤدي لتلف الأجهزة الإلكترونية المؤرصة بتلك المنظومة.

27.6.3 طرق الحد من تأثير الصواعق فى شبكات الجهد العالى:

يتم حماية المعدات الكهربائية من زيادة الجهد الناتج من الصواعق بتركيب مانعة صواعق Lightning arrester ويتم حماية خطوط النقل بواسطة سلك الأرضى المركب فى أعلى أبراج خط النقل .

و بالنسبة لمانع الصواعق فهى ببساطة عبارة عن مقاومة غير خطية تتغير قيمتها بتغير الجهد الواقع عليها فتكون قيمتها كبيرة جدا عند الجهود العادية المسموح بها و عند حدوث ارتفاع مفاجئ فى الجهد تقل قيمتها وتعمل Short مما يؤدى إلى تسريب الشحنة الكهربائية إلى الأرض و بذلك يتم حماية المعدات من الجهد المفاجئ (راجع تفاصيلها فى باب محطات التحويل).

ولكل مستوى جهد فى الشبكة الكهربائية توجد له قيمة معينة لا Over voltage لا يتعداها فمثلا خط نقل جهد 66 كيلوفولت تكون أقصى قيمة لزيادة الجهد هى 325 كيلوفولت طبقا للمواصفات القياسية IEC .

والجدول 4-28 يحتوى على البيانات الفنية لـ surge Arrester مركب على خط 220kV . ويمكن ملاحظة أهم بنود التوصيف فى مثل هذه الحالات من هذا الجدول.

Table 27-4 مواصفات مانعة الصواعق جهد 220 ك ف

Technical Datasheet	Offer number: 27051032	Attachment
Siemens H-Pos: 100; 3EP2 214-3PG43-1CZ1		
System Information		
Nominal System Voltage (Un)	220	kV
Highest Voltage of Equipment (Um)	245	kV
Basic Insulation Level (BIL)	1 050	kV
Maximum altitude of installation (a.s.l.)	1000	m
Neutral system earthing	solid	
Power Frequency	50	Hz
Electrical data		
Applied Standard	IEC 60099-4	
Rated voltage (Ur)	214	kV
Maximum continuous operating voltage (Uc / MCOV)	171	kV
Nominal discharge current (In, 8/20 µs)	20	kA
Line discharge class	4	
Long duration impulse current withstand (2 ms)	1 600	A
High current impulse withstand (4/10 µs)	100	kA
Rated short circuit current (0,2 s)	65,0	kA
Maximum residual voltage at :		
20 kA 1/2 µs	574	kV
5 kA 8/20 µs	463	kV
10 kA 8/20 µs	492	kV
20 kA 8/20 µs	541	kV
40 kA 8/20 µs	591	kV
500 A 30/60 µs	399	kV
1 kA 30/60 µs	409	kV
2 kA 30/60 µs	428	kV
Temporary overvoltage for 1 s	246	kV
Temporary overvoltage for 10 s	230	kV
Energy discharge capability - thermal	10,0	kJ/kV _r
Energy discharge capability - impulse	6,50	kJ/kV _r
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet) ¹	1 650	kV
Switching Impulse withstand voltage (250/2500 µs, wet) ²	1 175	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs) ¹	2 394	kV
Lightning Impulse withstand voltage (1,2/50 µs) ²	1 800	kV
Mechanical data		
Height (H)	4 860	mm
Minimum creepage distance	10 815	mm
Number of units	3	
Weight (G)	294	kg
Color of housing	brown	
Specified long-term load SLL (F _{stat})	1020	N
Specified short-term load SSL (F _{dyn})	2570	N
Grading ring diameter (d)	1 800	mm
Distance from grading ring to top (l)	1 400	mm
Drawing number	E T HP AR 27051032.0100	

27.7 الهزات الناتجة عن فصل الأعطال (فصل وتشغيل قواطع الدائرة)

عند حدوث عطل فإن الطاقة المخزنة في الـ Power System سواء المخزنة في الملفات أو المكثفات الخاصة بمعدات المنظومة ، هذه الطاقة تعتبر كمية هائلة ومن ثم فإن عملية قطع الدائرة تتمثل الصعوبة الأساسية فيها في كيفية التخلص من هذه الطاقة الهائلة وكيفية تفريغها من المنظومة. ويقع العبء الأكبر في أداء هذه المهمة على قاطع الدائرة CB حيث يتم داخله استهلاك معظم هذه الطاقة في صورة شرارة بين أقطابه ، لكن هناك جزء آخر من هذه الطاقة يستهلك في عملية Oscillatory Surges على خطوط النقل أو ما تسمى بالـ Travelling Waves وهي بالطبع عملية غير مرغوب فيها لأنه ينتج عنها ارتفاع مؤقت في جهد المنظومة (TOV (Temporary Overvoltage).

والشكل 16-28 يبين نموذجا لجزء من شبكة يحدث عليها عطل وكيفية عمل دائرة مكافئة لهذه الشبكة

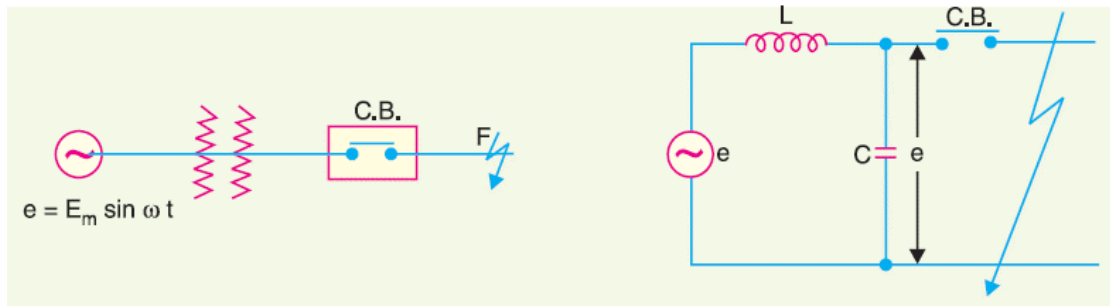


Figure 27-16

والدارس للقواطع الكهربائية يجب أن يكون ملما ببعض المصطلحات مثل :

جهد الـ Arcing Voltage وهو الجهد الذى يظهر بين طرفى القاطع أثناء عملية القطع. ثم عندما يصل التيار

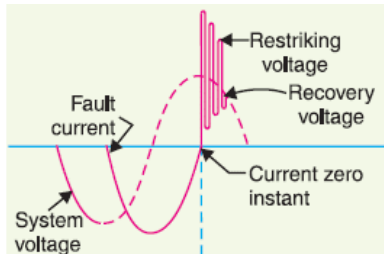


Figure 27-17

لقيمة تساوى صفرا أثناء القطع يظهر جهد جديد اسمه Restrike

Voltage كما فى الشكل 17-28 وهو يمثل الـ Transient

Voltage الذى يظهر بين طرفى القاطع عندما يمر التيار بنقطة

الصفر .

وهذه الهزة العابرة ناتجة عن إعادة توزيع وتبديل الطاقة الكهربائية

المخزنة فى كلا من المجال الكهربى والمغناطيسى للمصدر الكهربى والخط المتصلين كلاهما بالقاطع .

هذا الـ Oscillation يستمر لفترة وجيزة جدا كما فى الشكل لكن قيمته قد تصل إلى ضعف قيمة الجهد الأقصى

للمنظومة ويجب أن يكون القاطع قادرا على تحمل هذا الجهد.

وسيحاول هذا الـ Oscillation أن يستمر أطول ما يمكن محاولا عمل انهيار للقواطع وإعادة عملية التوصيل لكن

الـ Losses الموجودة بالقاطع ستضعفه حتى ينتهى ، وتظل المشكلة الوحيدة هى هذا الـ Overshoot الذى

حدث في البداية والذي قد يتسبب في كسر العزل بين أطراف الـ CB وبالتالي تبقى احتمالية أن تفشل عملية قطع التيار .

وعلى حسب قيمة الـ Rate of Rise لهذا الـ Restrike Voltage (تسمى RRRV) ستحدد ما إذا كانت الشرارة ستكسر العزل مرة أخرى أم لا .

فلو كان الـ Rate of Rise of Restrike Voltage, RRRV أعلى من Dielectric strength الخاص بالمادة العازلة المستخدمة بالقاطع فسينكسر العزل ويفشل القاطع في قطع التيار .

وتتوقف قيمة الـ RRRV على عدة عوامل منها قيمة Recovery Voltage وكذلك قيمة تردد الـ Oscillation .

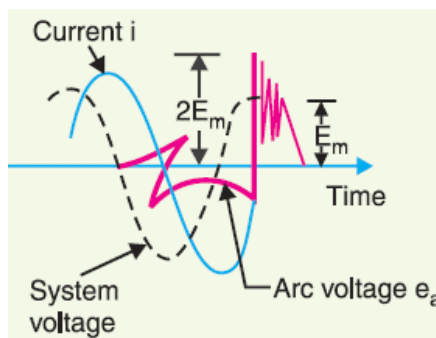


Figure 27-18

لاحظ أنه بعد حدوث العطل وقبل فتح الـ CB تكون الـ Capacitance غير مؤثرة لأن تيار العطل سيمر خلال الخط (الممثل بـ Inductance) ويرجع خلال الأرض في دائرة مغلقة ولا يحتاج لأي مسار بديل. وعلى هذا فجهد المولد مطبق كله على معاوقة حثية ، ولذا فالتيار تقريبا Pure Inductive حيث أهملنا مقاومة الدائرة ، وبالتالي يتأخر التيار عن الجهد بـ 90 درجة كما في الشكل 18-28

أما بعد فتح الـ CB فسيمر التيار خلال الـ Arc الداخلية فيظهر جهد بين طرفي القاطع يسمى Arc Voltage كما في الشكل السابق ويستمر التيار المتردد في المرور حتى ينجح الـ CB في قطعه نهائيا .

عند هذه اللحظة (بعد فتح القاطع) يكون جهد المولد ليس أمامه سوى الـ Ind والـ Cap الخاصين بالمنظومة وبالتالي يكونا معا دائرة رنين لها تردد يساوي

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وبالتالي يظهر فجأة Restrike Voltage بالتردد السابق بين أطراف الـ CB المفتوح محدثا نوعا من الـ Oscillation في الدائرة كما ذكرنا .

أما قيمة الـ v , Prestriking Voltage فتحسب من المعادلة :

$$v = V \left[1 - \cos \left(\frac{t}{\sqrt{LC}} \right) \right]$$

حيث V تمثل قيمة الجهد لحظة القطع ، وقيمة L (series inductance) and C (shunt Capacitance) تحسب من مكان القاطع حتى نقطة العطل وبالتالي كلما صغرنا (بمعنى أن العطل قريب من القاطع) كلما كان الـ Restrike Voltage أعلى وأخطر ، وبالتالي تزيد فرص حدوث الـ Restrike. والعكس صحيح.

Example 19.3. In a short circuit test on a circuit breaker, the following readings were obtained on single frequency transient :

(i) time to reach the peak re-striking voltage, $50 \mu \text{ sec}$

(ii) the peak re-striking voltage, 100 kV

Determine the average RRRV and frequency of oscillations

Solution.

$$\begin{aligned} \text{Average RRRV} &= \frac{\text{Peak re - striking voltage}}{\text{Time to reach peak value}} \\ &= \frac{100 \text{ kV}}{50 \mu \text{ sec}} = 2 \text{ kV}/\mu \text{ Sec} = 2 \times 10^6 \text{ kV/sec} \end{aligned}$$

Natural frequency of oscillations,

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{1}{2 \times \text{Time to reach peak value}} \\ &= \frac{1}{2 \times 50 \mu \text{ sec}} \\ &= \frac{1}{2 \times 50 \times 10^{-6}} = 10,000 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Example 19.2. A 50 Hz, 11 kV, 3-phase alternator with earthed neutral has a reactance of 5 ohms per phase and is connected to a bus-bar through a circuit breaker. The distributed capacitance upto circuit breaker between phase and neutral is 0.01 μ F. Determine

- (i) peak re-striking voltage across the contacts of the breaker
- (ii) frequency of oscillations
- (iii) the average rate of rise of re-striking voltage upto the first peak

Solution.

Inductance per phase, $L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{5}{2\pi \times 50} = 0.0159 \text{ H}$

Capacitance per phase, $C = 0.01 \mu\text{F} = 10^{-8} \text{ F}$

- (i) Maximum value of recovery voltage (phase to neutral)

$$E_{\max} = \sqrt{2} \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 8.98 \text{ kV}$$

\therefore Peak re-striking voltage = $2 E_{\max} = 2 \times 8.98 = 17.96 \text{ kV}$

- (ii) Frequency of oscillations is

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.0159 \times 10^{-8}}} = 12,628 \text{ Hz}$$

- (iii) Peak re-striking voltage occurs at a time t given by ;

$$t = \frac{1}{2 f_n} = \pi \sqrt{LC} = \pi \sqrt{0.0159 \times 10^{-8}} = 39.6 \times 10^{-6} \text{ sec} = 39.6 \mu \text{ sec}$$

- \therefore Average rate of rise of re-striking voltage

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Peak re - striking voltage}}{\text{Time upto first peak}} = \frac{17.96 \text{ kV}}{39.6 \mu \text{ sec}} \\ &= 0.453 \text{ kV}/\mu \text{ sec} = 453 \times 10^3 \text{ kV/sec} \end{aligned}$$

27.7.1 طرق الحد من ارتفاع الجهد على أطراف الـ CB

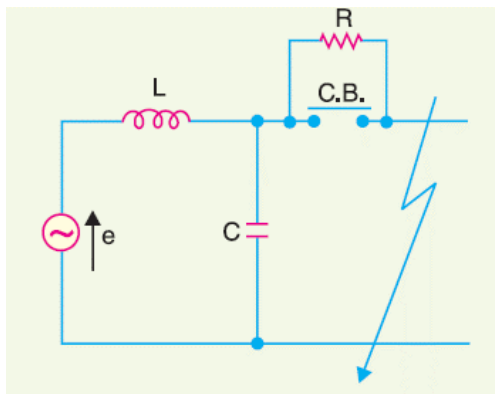


Figure 27-19

فى الجزء السابق تبين حدوث جهود عالية لاسيما فى حالات الـ Capacitive switching وهنا نعترض لواقعة من الطرق المعروفة للحد من هذا الارتفاع وذلك بإضافة مقاومة على التوازي مع القاطع كما فى الشكل 19-28.

الآن ، عند فصل القاطع وحدث شرارة كما سبق فالجديد هنا أن جزءا من تيار الـ Arc سيمر خلال مقاومة وبالتالي يقل التيار الأسمى الذى كان السبب فى تأين مسار الشرارة. وكلما زادت مقاومة مسار الـ arc كلما زادت نسبة التيار المار خلال المقاومة الخارجية حتى ينقطع تماما تيار الشرارة وتتطفئ بسرعة أكبر مما سبق.

أيضا هذه المقاومة تعمل على الحد من نمو اهتزازات Restrike Voltage ويمكن أن نثبت رياضيا أن تردد هذه الهزات العابرة قد أصبح يساوى

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4R^2C^2}}$$

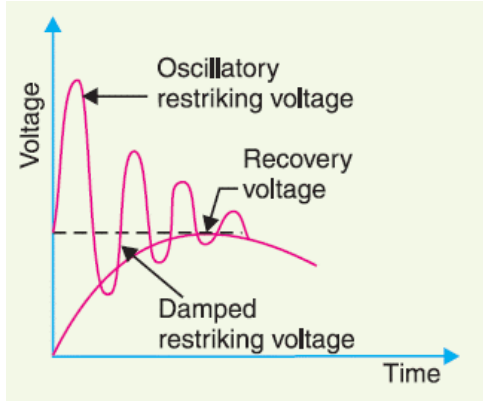


Figure 27-20

$$0.5\sqrt{L/C}$$

فإذا كانت قيمة المقاومة تساوى

فهذا يعنى أن التردد أصبح مساويا صفر وأن الاهتزازات لن تتجاوز قيمة الـ Recover Voltage كما فى الشكل 20-28 ويقال أن الدائرة فى وضع Critically Damped أى على حافة الوصول للقيمة التى لا يحدث معها اهتزازات.

27.8 الهزات الناتجة عن فصل/توصيل المكثفات CAPACITOR SWITCHING

تعتبر المكثفات عنصرا أساسيا فى منظومة القوى الكهربائية ، ولها استخدامات عديدة فى مجالات التحكم ومجالات جودة القدرة Power Quality ضمن أجهزة الـ Power Conditioning . كما تستخدم المكثفات لتزويد أو مد النظام الكهربى بالقدرة التفاعلية " Reactive Power " والتي تستخدم فى تصحيح معامل القدرة الكهربائية " Power Factor Correction " .

وتستخدم كذلك ضمن الـ Filters المستخدمة لمنع التوافقيات مثلا (راجع فصل التوافقيات التالى) كما تستخدم ضمن منظومة الـ FACTS بأنواعها (راجع الفصل الأخير فى باب نقل القوى الكهربائية) وضمن أجهزة إلكترونيات القوى ولاسيما مع الـ Converters بأنواعها.

وبعض المكثفات يتم توصيلها بالشبكة و شحنها بصورة دائمة Fixed Bank وهذا النوع يمكن أن يغير الـ Time Constant للشبكة أو لجزء منها. (راجع مفهوم الـ TC فى بداية هذا الفصل).

و البعض الآخر يتم توصيلهم أو فصلهم طبقا لمستوى التحميل على الشبكة ، أو طبقا لكمية الـ Reactive Power المراد إمداد الشبكة بها ، و هذا النوع هو المنسوب إليه ظاهرة زيادة الجهد Overvoltage لأن النوع الأول لا يحدث فيه Switching وبالتالي لا يسبب مشاكل مثل النوع الثانى.

27.8.1 ماذا يحدث عند توصيل المكثفات؟

ويترتب على عمليات تشغيل المكثفات Capacitor Switching عدة ظواهر تتعلق كلها بالارتفاع في الجهد أو تتسبب في حدوث Oscillatory Transient، منها على سبيل المثال:

1- ظهور Steep Front Surge في لحظة توصيل المكثف. والسبب في ذلك أن المكثف يبدو للمصدر

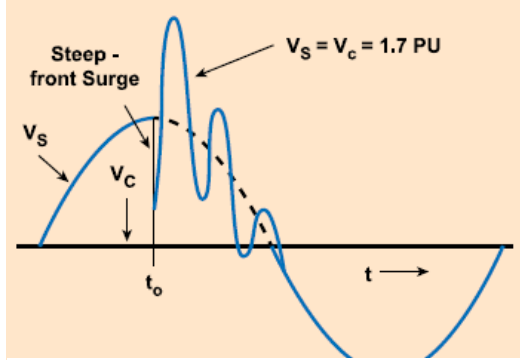


Figure 27-21

كما لو كان Short Circuit في لحظة التوصيل بسبب التردد العالي لحظة البدء ، ثم تبدأ تظهر له إخماد Damping لكن بعد أن تكون هناك موجة جهد عالية تتردد ذهابا وإيابا (فتكون إشارتها موجبة مرة وسالبة مرة أخرى) بين المصدر والحمل محدثة ترددات عالية بعد عملية التوصيل كما أن هذه الـ Travelling Wave تجمع على الجهد

الأصلى مرة وتطرح مرة حسب الإشارة كما أسلفنا فتحدث ارتفاعات وانخفاضات في قيمة الجهد وهذا هو السبب في تجاوز الجهد للقيم المقننة حتى يصل إلى 170% كما في الشكل 28-21.

- 2- أيضا يترتب على عملية توصيل المكثف اهتزازات عابرة نتيجة لتبادل الطاقة بين ملفات الشبكة ومكثفاتها ، فتنتج هذه العملية مدى واسعا من الترددات وهذه الترددات يمكن أن تتسبب في حدوث ظاهرة الرنين.
- 3- ومن توابع عملية توصيل المكثفات أن ينتقل الجهد العالي من الجانب الابتدائي للثانوى في المحولات وبذلك يحدث للجهد نوع من التكبير لأن هذه الموجات سيتم جمعها على الجهد الطبيعي الموجود في الجانب الثانوى ومن ثم يرتفع الجهد عند المستهلكين ربما إلى ثلاثة أمثال القيمة الطبيعية.

ويلاحظ أن نسبة تكرار حدوث الـ overvoltage الناتج عن عملية الـ switching أكبر من نسبة تكرار حدوثه نتيجة لـ lightning ، حيث أن ظاهرة الـ lightning ظاهرة موسمية قد تحدث وقد لا تحدث ، أما الـ switching فهي ظاهرة أو عملية دائمة الحدوث لاسيما بسبب المكثفات المستخدمة في تحسين معامل القدرة ، نظرا لتغير قيمة الـ power factor من وقت إلى آخر ، مما يترتب عليه فصل وتوصيل المكثفات المكثفات على الشبكة.

ملحوظة :

حدوث الزيادة في الجهد Overvoltages بسبب عمليات الـ Switching قد يكون أكبر من الـ Overvoltages نتيجة الصواعق في EHV & UHV System Voltages ، وقد كانت المراجع في السابق لا تهتم سوى بالزيادة الناتجة من الصواعق ولكن مع الارتفاع في جهد خطوط النقل وأيضاً مع الأطوال الكبيرة لهذه الخطوط لاسيما الأكثر من 300 كيلوفولت حيث تصبح قيمة المكثفات بين الخطوط والأرض عالية جداً وتتسبب في حصول هذه الزيادة في الجهد عند تشغيل هذه الخطوط. ولتقليل هذا الأثر أو تخفيف قيمة الزيادة يتم تركيب Shunt Reactors على نهاية الخطوط.

27.8.2 ماذا يحدث عند فصل المكثفات؟

بالنظر إلى الحالة المرسومة في الشكل 28-22 والتي قد تمثل عملية فتح الـ CB في وجود مكثفات تحسين

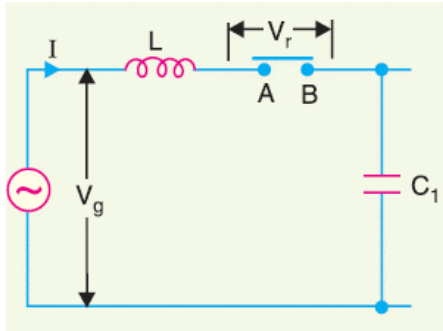


Figure 27-22

معامل القدرة أو تمثل فتح خط نقل طويل له Stray Capacitance بقيمة معتبرة والخط غير محمل Unloaded . وسندرس ماذا يحدث في أسوأ الحالات . وذلك عند فتح الـ CB بينما قيمة تيار المكثف صفر وبالتالي فالجهد يكون قيمة عظمى (الجهد متأخر عن التيار بـ 90 درجة في دوائر المكثفات كما هو معلوم)

الآن ، لو فرضنا أن لحظة فتح الـ CB كانت عند نقطة 1 هذا يعني أن جهد نقطة B (الطرف الآخر للـ CB

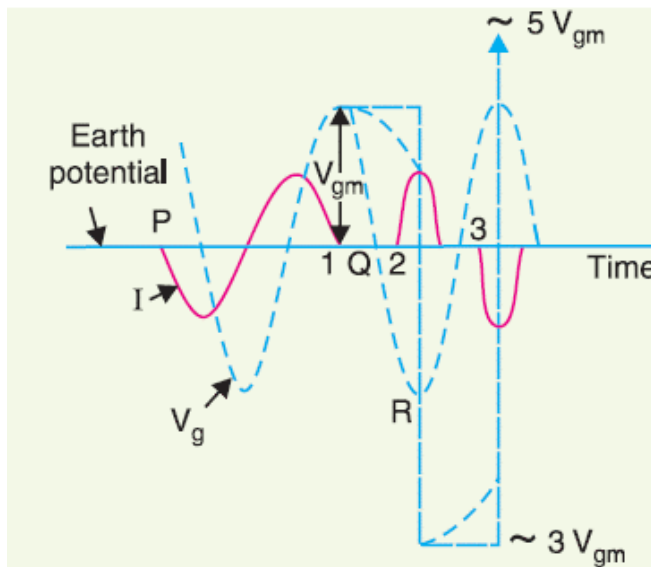


Figure 27-23

سيكون مساوياً لـ V_{gm} (max of V_g) ويظل ثابتاً على ذلك طالما أن المكثف لم يفرغ شحنته. بينما يكون جهد نقطة A وهي الطرف الأول للـ CB مساوية لجهد المولد أو بمعنى آخر متغيرة القيمة حسب المنحنى الأزرق المنقط في الشكل 28-23.

وعندما نصل إلى نقطة R على الرسم يكون فرق الجهد بين طرفي الـ CB

قد وصل إلى $2V_{gm}$ وذلك كما فى المعادلة

$$(V_{gm} - (-V_{gm}))$$

وهذا الجهد قد يكون كافيا لكسر العزل بين طرفى الـ CB ويحدث له Re-Strike وتتسأ شرارة بين قطبيه ، وعندها يقوم المكثف بتفريغ شحنته خلال هذه المقاومة الصغيرة وينشأ High Frequency Transient بتردد يتوقف على قيمة L and C الموجودين بالنظام.

وكما سبق أن درسنا فإن القيمة العظمى لجهد الـ Re-strike Voltage تكون مساوية لضعف قيمة الجهد على أطراف القاطع ، وحيث أن الجهد على أطراف القاطع قد وصل إلى $2V_{gm}$ ومن ثم ستصل قيمة الـ Re-Strike Voltage إلى $4 V_{gm}$ عند نقطة R وقد يصل إلى $5V_{gm}$ عند الوصول إلى أول Positive Peak لجهد المصدر كما فى الشكل ، لكن وبسبب الكورونا وبسبب الفقد فى الطاقة فإنه لا يصل غالبا لهذه القيمة العالية بل يحدث نوع من الـ Decaying Oscillatory .

وما يهمنا هنا هو اللحظات الأولى التى تحدثنا عنها والتى يتولد فيها Surge Oscillatory Voltage نتيجة فصل خط طويل غير محمل أو نتيجة فصل دائرة تحتوى على مكثفات لتحسين معامل القدرة ، وهذه الموجة العالية ترحل ذهابا وإيابا على طول الخط مسببة ارتفاع الجهد على عوازل الخط والمعدات الأخرى ، حيث يتم تبادل الطاقة المخزنة فى المكثفات $0.5 CV^2$ مع الطاقة فى الملفات $0.5 LI^2$ ، ويتم هذا التبادل بتردد يساوى التردد الرنينى Resonance Frequency ، وهذا قد يؤدى كما ذكرنا لمشاكل فى عوازل المعدات وحتى مشاكل للـ Surge arrestors المركبة إن لم تكن مصممة بصورة صحيحة لاستيعاب وتبديد هذه الطاقة .

طرق الحد من مشكلة الـ Capacitor switching:

- فصل أغلب المكثفات فى حالات التحميل الضعيف لمنع ظاهرة الـ over-compensation.
- تجنب مشكلة شحن المكثفات باستخدام fixed reactor و pre-insertion resistor .
- إضافة Surge arrestors.

27.9 الاهتزازات الناتجة عن فصل وتشغيل بعض الأحمال

هناك أحمال تتسبب فى حدوث Transient بالشبكة مثل بدء تشغيل المحركات الذى يسحب تيار بدء قد يصل لستة أمثال التيار الطبيعى وكذلك بدء تشغيل المحولات الذى يسحب Inrush currents أيضا مرتفعة جدا. وتيارات الاندفاع لا تمثل فقط مشكلة بسبب التيار المرتفع ولكنها تمثل مشكلة بسبب التوافقيات التى تظهر على

تيار بدء المحولات والتي قد تتسبب في ايجاد تردد رنيني يسبب حالة من الـ Resonance وما يترتب عليه من ارتفاع في الجهد والتيار. وهذه التيارات قد تستمر من 10-15 cycle .

الشكل 24-28 يمثل الجهد الناتج عن حالة بدء تشغيل محول حيث يتضح أن الجهد يأخذ في الارتفاع بعد عدة دورات من التشغيل ومن الملاحظ أن هذا الجهد قد يزداد ليتعدى الـ 2pu وهذا الارتفاع في الجهد يستمر لعدة دورات .

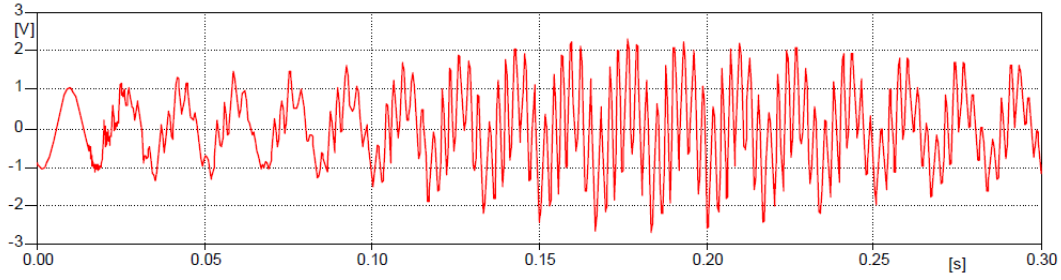


Figure 28-24 الجهد بعد تشغيل أحد المحولات

والشكل 25-28 يمثل حالة بدء تشغيل محرك قدرة 50 حصان ، ورغم أن الفترة الزمنية التي استغرقها النظام ليتعافى من هذه الهزة لم تتجاوز نصف دورة إلا أن التغيرات في الجهد يمكن أن تكون كافية لفصل بعض الأجهزة الحساسة التي تتغذى من نفس الـ BB .

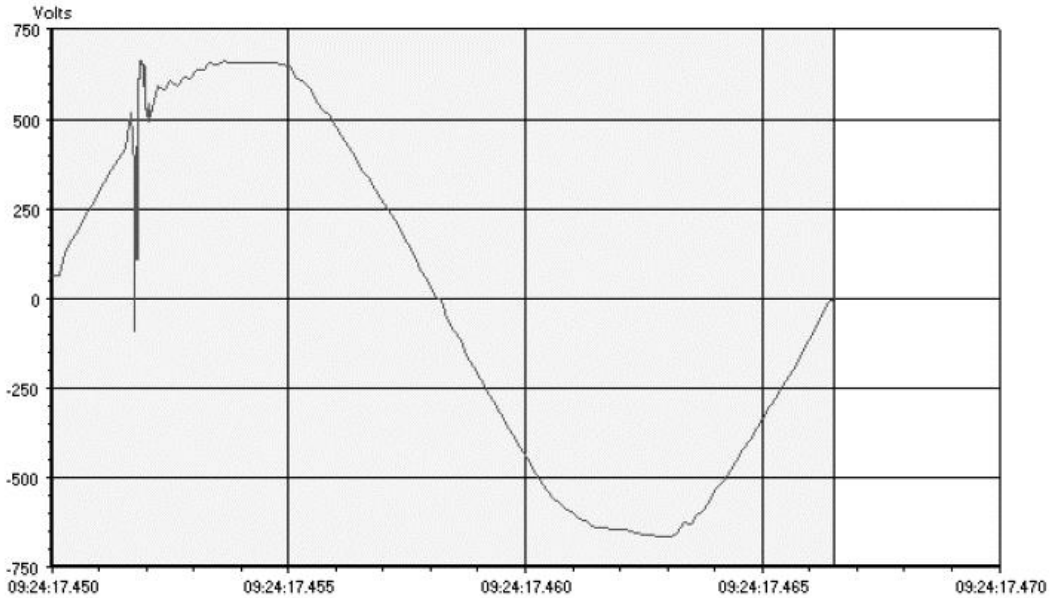


Figure 27-25 تأثير تشغيل محرك 50 حصان

وحتى الأحمال الصغيرة مثل لمبات الفلورسنت تسحب أيضا عند البدء تيارات عالية تسبب نوعا من الـ Transients بشبكة الجهد المنخفض وبالطبع فهذه التيارات سترتب عليها حدوث Transient Voltages وهذه الأخيرة قد تؤثر على الأحمال الحساسة لتغير الجهد.

27.10 الهزات العابرة الناتجة عن ظاهرة Ferro Resonance

هو نوع من الرنين ولكنه لا ينتج بسبب التوافقيات مثل الرنين العادي لكنه نوع خاص من الرنين يمكن أن يقال أنه Nonlinear Resonance لأنه يحدث بين (Iron core inductor) Non Linear Inductance مع مكثف المصدر المتصل به على التوالي لحظة حدوث Disturbance في الشبكة (غالبا في حالات حدوث Open circuit condition) وبالتالي يختلف عن الرنين العادي الذي يحدث عند تساوى معاوقة ملف خطى ومكثف عند تردد محدد وفيه يتغير الجهد والتيار خطيا ، بينما يتميز الـ Ferro resonance بوجود ارتفاع في الجهد (يمكن أن يصل إلى 12 ضعف الجهد المقنن ، مع تشوهات كبيرة غير خطية في موجاتها ويمكن أن تسبب تدمير كارثي للمعدات).

وفي حالة الـ Ferro resonance أيضا تكون التغيرات معتمدة ليس فقط على التردد بل على قيمة التغير الحاد الذى يحدث للجهد وقيمة الفيض المغناطيسى فى قلب المحولات.

أحد أشهر أمثلة هذا الرنين هو حدوث Open circuit على أحد فازات كابلات متصلة بمحول توزيع مثلا، فالآن توافرت كافة الشروط السابقة وأصبح المصدر متصلا فقط بمكثفات الكابل على التوالي مع Inductance المحول ، وقتها يصبح لدينا ارتفاع كبير فى الجهد يمكن أن يدمر العزل.

ويمكن تفسير الظاهرة على النحو التالي: بإعتبار دائرة RLC موصلة على التوالي كما بالشكل 26-28 و بإهمال قيمة المقاومة للحظة يمكن أن يمثل التيار بالتعبير التالي :

$$I = \frac{E}{j(X_L - |X_C|)}$$

where E = driving voltage
 X_L = reactance of L
 X_C = reactance of C

عندما $X_L = X_C$ سوف ينتج تيار كهربى بمقدار كبير

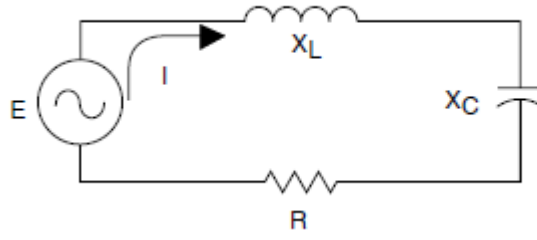
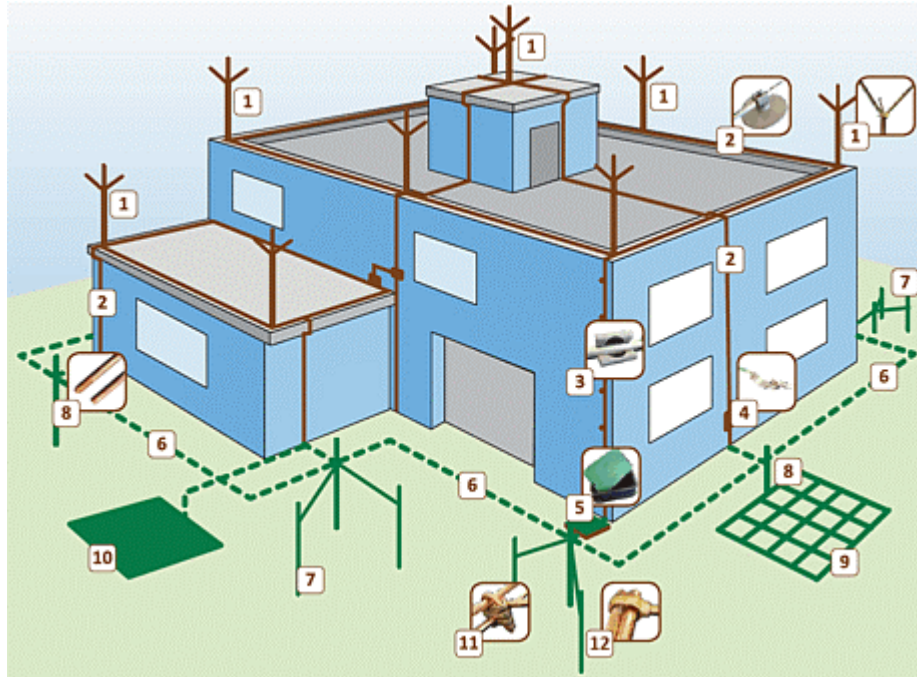


Figure 27-26

27.11 وسائل الحماية من الـ Voltage Surges فى شبكات الجهد المنخفض

توجد وسائل متعددة للحماية من ارتفاعات الجهد فى شبكة الجهد المنخفض ، فمنها ما يعتبر حماية أولية مثل استخدام عصا مانعات الصواعق التى تتركب فى المباني المرتفعة ، أو استخدام فكرة Faraday cage بتحزيم المبنى بموصلات نحاسية ثم توصيلها بشبكة الأرضى كما فى الشكل من أجل منع إصابته بالصواعق .



ومنها أيضا حمايات توضع فى الشبكة الكهربائية نفسها (مع الأجهزة أو داخل لوحات التوزيع) ، وهذه تصنف على أنها حماية ثانوية ، وهذه قد يتم توصيلها على التوالي مع الجهاز كما فى حالة الـ Filters ، وقد يتم توصيلها على التوازي كما فى حالة استخدام الـ Voltage limiters ، أو عند استخدام الـ Low Voltage Surge Arrestors .

وهناك تقنيات متعددة لتصنيع وتنفيذ هذه الحماية ، فأشهر طرق الحماية من الـ Voltage Surges التي تنتقل وتظهر في شبكة الجهد المنخفض هو استخدام أحد الطرق التالية:

- تركيب Zener diode على التوازي مع المعدات المراد حمايتها حيث يتميز بسرعة استجابته للتغير في الجهد ، ولا يسمح بتسرب تيار أثناء التشغيل الطبيعي خلاله ، لكن يعيبه أن لا يتحمل قدرة كبيرة خلاله ، لذا يستخدم فقط كأداة مساعدة.
 - استخدام محولات العزل Isolation transformers ، وهذه المحولات لها Inductance عالية ، وبالتالي فالـ inductive reactance لها تزيد مع زيادة التردد ومن ثم تستخدم في إضعاف موجة الجهد العالي وتمنع انتقالها إلى الجانب الآخر من المحول. وهذه المحولات لها Turns ratio = 1 .
- لاحظ وجود ميزة أخرى لمحولات العزل وهي أنه لا يوجد مسار لرجوع التيار المار خلال هذا الشخص (شكل 27-28) سوى خلال المعاوقة الكبيرة لمحول العزل ومقاومة الأرض ، ومن ثم فالتيار خلال هذا الشخص يعتبر مهملًا.

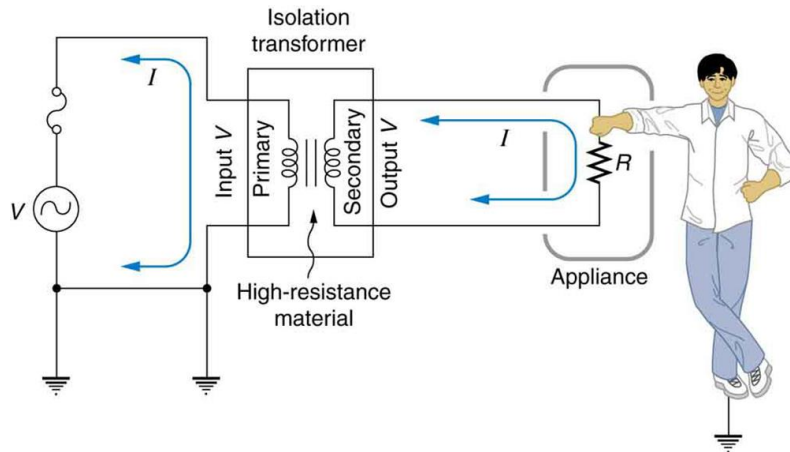


Figure 28-27 استخدام محولات العزل

- استخدام الفاريستور Varistor ، وهو يزيد عن ميزات Zener أنه يتحمل قدرة كهربية عالية خلاله. وهو الأكثر استخداما في كافة مستويات الجهود بالشبكة (العالية والمتوسطة والمنخفضة).
- وأخيرا استخدام ما يعرف بالـ Power Conditioners

القسم الثالث من أنواع الهزات العابرة

الهزات العابرة المسببة لانخفاض فى الجهد

27.12 ظاهرة هبوط الجهد

انخفاض الجهد تعتبر الظاهرة الأكثر حدوثا فى الشبكات الكهربائية ، كما هى الأكثر تنوعا فى مظاهرها ، فتحت هذا العنوان يندرج العديد من مظاهر هبوط الجهد منها:

- 1- الانخفاض المستمر للجهد: Sustained Voltage Drop/ Under Voltage
- 2- الانخفاض القصير (المؤقت) : Voltage Sag/Dip
- 3- انخفاض يصل إلى حد الانقطاع Voltage Interruption ، وهذا الانقطاع قد يكون طويلا أو قصيرا ، ويعرف بأنه حدوث تلاشى للجهد بنسبة 100% من جهد التغذية لفترة زمنية تزيد عن الثانية الواحدة ، وقد يكون هذا الانقطاع مخططا planned outage ، أو إجباريا forced outage وهو الانقطاع الذى يحدث فجأة دون معرفة وقت حدوثه.
- 4- ويمكن أن نضيف إليهم أيضا ظاهرة ارتعاش الجهد Voltage Flicker

27.12.1 الانخفاض المستمر للجهد Under Voltage

هو انخفاض للجهد تتراوح قيمته بين 10% إلى 90% من القيمة المقننة للجهد الأسمى ، ويستمر لفترة طويلة تزيد عن دقيقة وقد تصل إلى ساعات متصلة (إذا قلت المدة عن دقيقة يعتبر Sag) . مع ملاحظة أنه لو وصلت قيمة الانخفاض إلى أقل من 10% من القيمة الأصلية فيسمى انقطاع Interruption وليس انخفاض.

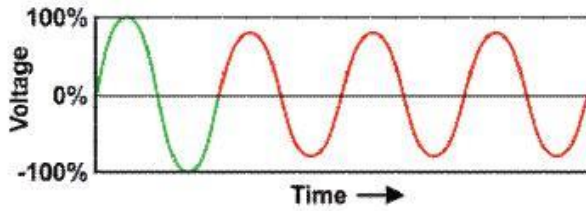


Figure 27-28 هبوط دائم فى الجهد

ودائما يجب التأكد من أن الهبوط فى الجهد Voltage Drop عند نهاية الكابل نتيجة مرور التيار لن يتعدى القيم القياسية المسموح بها هو 4% فى الظروف الطبيعية ، أو 8% فى ظروف الطوارئ (فى بعض المواصفات تتراوح 3-6%). وهذا النوع لا يصنف ضمن الهزات العابرة.

أبسط أسباب انخفاض الجهد هو الانخفاض الناتج عن الـ Voltage drop ، والذي ينشأ بسبب مرور التيار خلال أسلاك التوصيل $VD = I.R$. ومن أسبابه :

- 1- زيادة الأحمال عند المشتركين خصوصا في وقت الذروة والذي يؤدي إلى زيادة التيار المسحوب وينتج عنها زيادة قيمة voltage drop ويؤدي لانخفاض الجهد عند المستهلك .
- 2- عدم اختيار مقطع مناسب للكابلات مما يؤدي أيضا إلى زيادة voltage drop .
- 3- وجود الوصلات بين الكابلات وبعضها أو بين الكابلات والبارات حيث أنه ينتج عنها contact resistance وتزيد قيمة المقاومة العامة للكابل مما يؤدي إلى زيادة الـ voltage drop

27.12.2 الانخفاض (العابر) للجهد Voltage Sag

هو انخفاض في الجهد تتراوح قيمته ما بين 10% إلى 90% من قيمة الجهد أو التيار الأصلي ، لكن يختلف عن المصطلح السابق في استمراره لفترة زمنية قصيرة ، تتراوح ما بين أقل من نصف دورة إلى دقيقة . ولذا يصنف ضمن الهزات العابرة.

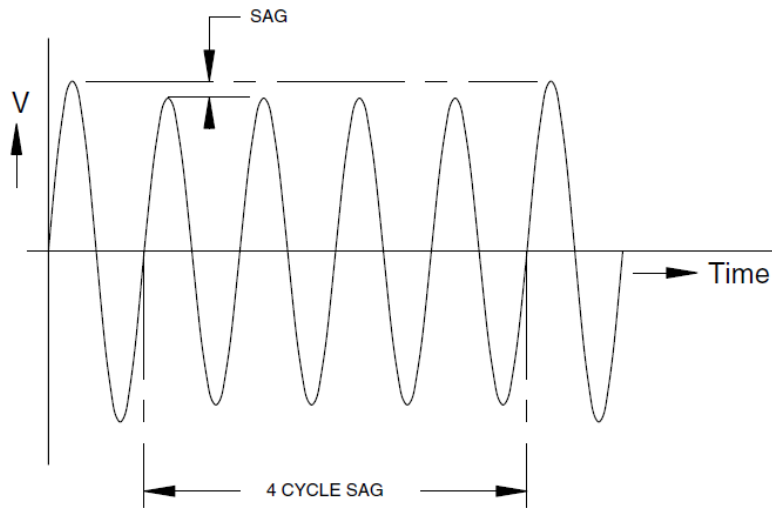


Figure 27-29 هبوط عابر في الجهد

وأهم أسباب الانخفاض العابر للجهد هي:

- 1- ارتفاع قيمة الـ Voltage Drop
- 2- حالات القصر Short Circuit
- 3- بدء تشغيل المحركات الكبيرة

وفيما يلي نشرح تفاصيل هذه الأسباب:

27.12.3 انخفاض الجهد الملوّقت بسبب حالات القصر Short Circuit

وتتوقف قيمة الانخفاض في الجهد في هذه الحالة على طريقة توصيل الحمل ، و هل هو موصل على شكل دلتا أو موصل على شكل ستار ، كما يتوقف على نوع العطل وهل هو SLG or 2LG, Phase to phase وكذلك يتوقف على قيمة مقاومة التأسيس في نقطة التعادل وهكذا.

ففي حالة التوصيل على شكل ستار وحدث عطل من النوع SLG فإنه يحدث هبوط لجهد الـ Phase المعطل بينما لا تتأثر الـ two phases الأخرى تقريبا إذا كانت نقطة التعادل مؤرضة بطريقة مباشرة , Directly Earthed , $Z_E = 0$.

أما إذا كانت نقطة التعادل مؤرضة خلال مقاومة فسينخفض جهد الـ Phase المعطل كما سبق لكن سيرتفع جهد الـ Phases الأخرى. ويمكن فهم هذه الظاهرة من الشكل 28-30:

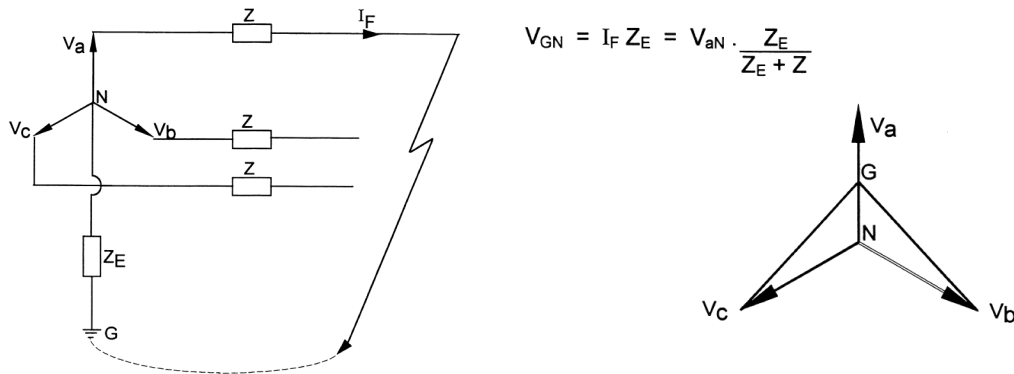


Figure 28-30 انخفاض الجهد على الفازة المعطلة نتيجة زحزة نقطة التعادل

واضح أن جهد الـ N ارتفع ليصبح بقيمة تساوى V_G بدلا V_N الذى كان يساوى صفرا قبل العطل ، وهذا تسبب في انخفاض جهد الـ V_a لأنه أصبح يساوى $V_a - V_G$ والطرح هنا جبرى لأنهما من نفس الـ Phase ، بينما ارتفع الجهد على الـ two phases الآخرين لأن Phase-B مثلا أصبح يساوى من الرسم $V_b - V_G$ والطرح هنا اتجاهى لأنهما من Two Different Phases .

والشكل 28-31 يظهر أنواعا أخرى من تأثر الجهود بالأعطال

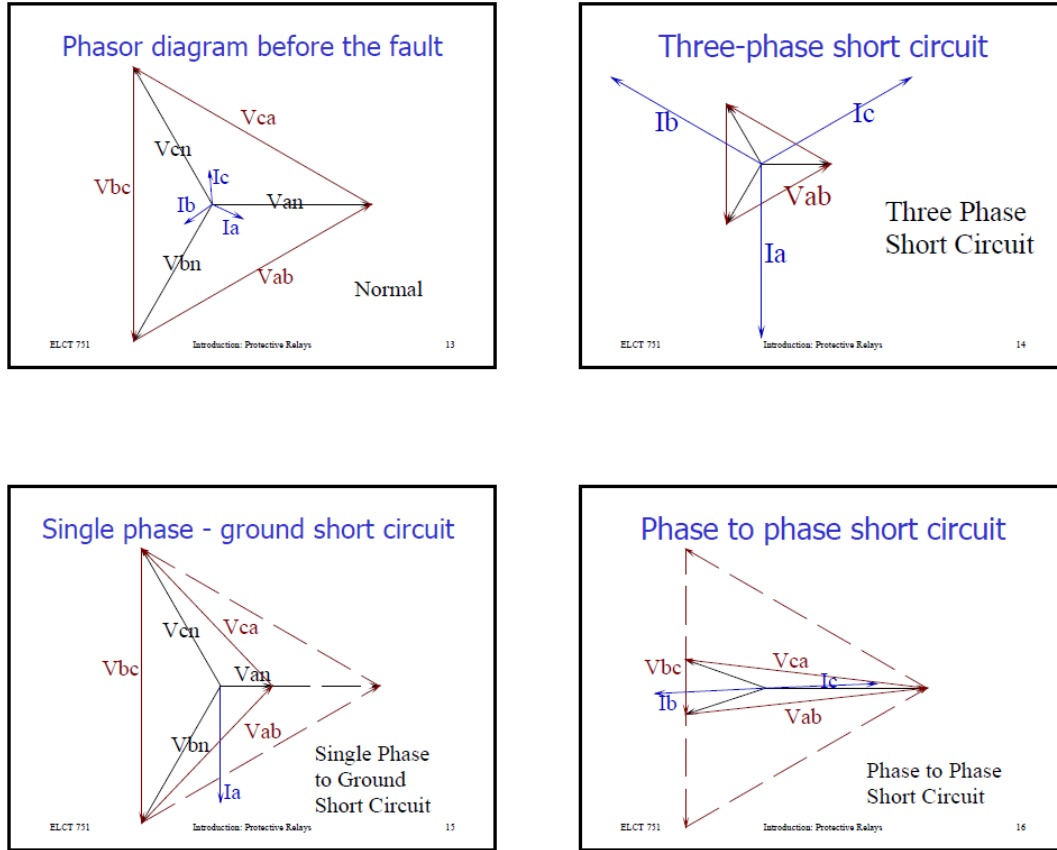


Figure 27-31

27.12.4 انخفاض الجهد المؤقت بسبب بدء تشغيل المحركات الكبيرة

عند تشغيل المحرك فإنه يسحب تيارا كبيرا يكون أكبر من التيار الطبيعي بحوالي 5-6 مرات فيتسبب في حدوث voltage drop نتيجة معاوقة الخط $(R + jX)$ ، بحيث يحدث انخفاض في الجهد عند Point of Common Coupling, PCC (شكل 28-32) ، وبالتالي يؤثر على باقي الأحمال المشتركة في هذه النقطة. هذا الانخفاض في الجهد قد يؤدي لإطفاء مصابيح التفريغ الغازي وقد يؤدي لعدم قدرة بقية المحركات على القيام بعملية البدء أثناء فترة انخفاض الجهد .

المشكلة أيضا أن هذا التيار هو تيار حتى بمعنى أن له معامل قدرة Power Factor منخفض جدا يصل إلى 0,3 ومن ثم تتسبب الزيادة الفجائية في التيار المسحوب في سحب قدرة غير فعالة عالية جدا مما يجعل الهبوط في الجهد مضاعف. وهذا ما جعل المصممون يفضلون بدء المحرك عن طريق توصيله بإحدى وسائل البدء (Soft Starting or Delta/Star switch) التي تحد من قيمة التيار المرتفع ولا تؤثر على عزم البدء المطلوب.

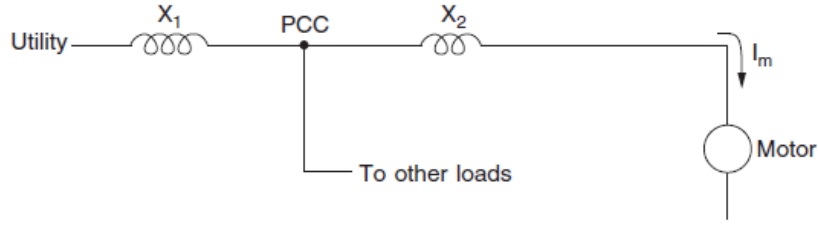


Figure 27-32

ومن الأسباب الأخرى لانخفاض الجهد:

- 1- الزيادة المفاجئة للأحمال أو دخول عدد من الأحمال الكبيرة في وقت قصير
- 2- تشغيل ماكينات اللحام بالقوس الكهربى حيث أنها تسحب تيارا كهربيا عاليا أثناء عملية اللحام.

27.12.5 ظاهرة ارتعاش الجهد (Voltage Fluctuation (flicker

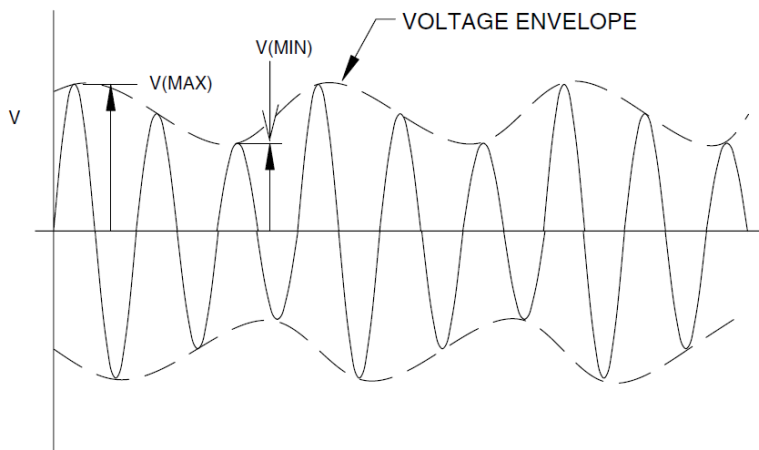


Figure 27-33 ارتعاش الجهد

هي عبارة عن تغيرات متتالية في الجهد (شكل 28-33) تحدث بشكل عشوائي و تكون قيمة هذا التغير بنسبة 10 % من قيمة الجهد الأصلية فتسبب ارتعاشات في الإنارة والشاشات .

أسباب حدوث ارتعاش الجهد:

- 1- نوعية الأحمال في المكان. التشغيل و الإيقاف المستمر للمكينات مثل الاسانسير
- 2- الأفران الكهربائية (أفران صهر المعادن). تعطى أفران القوس الكهربى فكرة واضحة لمعنى ارتعاش الجهد ، حيث أنه لحدوث القوس الكهربى فإننا نحتاج تيار عالى مما يسبب انخفاض فى الجهد ، وعندما ينطفئ القوس الكهربى لا يمر تيار فيرجع الجهد لقيمه الأصلية وهكذا. وعلى ذلك فإن التيار يتغير عشوائيا خلال دوره الانصهار مما يسبب تغير (ارتعاش) فى الجهد . يمكن ملاحظة ذلك بشدة من خلال الرعشة التى تحدث للمصابيح المتوهجة المغذاة من نفس مصدر تغذية الأفران .
- 3- التوصيلات السيئة.

4- ماكينات اللحام بالمقاومة resistance welding بمصانع الحديد والصلب تسبب أيضا voltage fluctuation عند تغذية عدة ماكينات لحام من نفس محول التوزيع حيث يكون تشغيلها عشوائيا أحيانا ويمكن أن تجد كثيرا من ماكينات اللحام تعمل في نفس الوقت.

27.12.6 تأثير هبوط الجهد على الأحمال المختلفة

التأثير على الأجهزة الإلكترونية

رغم أن هذه الأجهزة هي أحد أهم المصادر التي تسبب عدم جودة القدرة ، فإنها أيضا أكثر الأجهزة التي تعاني من عدم جودة المصدر ، فحتاج الأجهزة الإلكترونية إلى بيئة كهربية متحكم فيها أكثر من احتياج أغلب الأحمال الأخرى ، فعند حدوث انخفاض في الجهد فعندئذ يتوقف الجهاز عن العمل أو تنتشوه البيانات .

التأثير على المحركات

يؤدي الانخفاض في الجهد على المحرك الحثي Induction Motors إلى :

- 1- انخفاض عزم البدء للمحرك مما قد يؤدي إلى تلف المحركات التي تدير أحمالا ميكانيكية ذات قصور ذاتي مرتفع لأن المحرك سيضطر لسحب تيار أعلى بكثير من المقنن ومن ثم تحرق ملفاته.
- 2- زيادة تيار البدء سيؤدي بالضرورة إلى حدوث Voltage Sag
- 3- إذا نجح المحرك في البدء فستظل لديه مشكلة أثناء التشغيل لأن حرارة الملفات سترتفع بسبب ارتفاع قيمة التيار (تذكر أن هذه المحركات تعتبر Constant Power بمعنى أن انخفاض الجهد حتما سيؤدي لارتفاع التيار)

التأثير على لمبات الإضاءة

أغلب نظم الإضاءة تكون قادرة على احتمال حدوث الانحدارات في الجهد مثل:

اللمبات المتوهجة incandescent lamp

فالانخفاض في الجهد سيؤدي إلى انخفاض الإضاءة لامحالة (انخفاض في الجهد إلى 90% يؤدي إلى انخفاض الإضاءة إلى 70% من مقننها في بعض اللمبات وانخفاض الكفاءة الضوئية إلى 80%) . لكن في هذه النوعية من اللمبات يؤدي الانخفاض في الجهد إلى زيادة العمر الافتراضي لأن تيار المصباح أيضا ينخفض (لا يعتبر من أجهزة الـ Constant Power) .

مصابيح الفلورسنت fluorescent lamp

تتأثر هذه اللمبات بدرجة أكبر من اللمبات السابقة بسبب وجود Chock Coil ، وفي هذا النوع أيضا يتسبب الارتفاع أو الانخفاض في تقصير العمر الافتراضي. وإذا انخفض الجهد بدرجة كبيرة (70%) مثلا فإنه يؤثر على الـ Electronic Ballast ويصبح غير قادر على تجهيز الطاقة لحدوث القوس داخل الأنبوبة و هذا يعني ظلام اللبة ولكنها تعود للعمل مباشرة بعد رجوع الجهد لحالته الطبيعية.

مصابيح التفريغ شديدة الكثافة high intensity discharge – metal halide

مثل مصابيح الصوديوم والزرنيق وهذه المصابيح تتأثر بشدة بتغير الجهد فينطفئ المصباح إذا انخفض الجهد عن 80% ، والمشكلة الأكبر أنه إذا تكرر الانقطاع والتوصيل فهذا يؤثر بشدة على العمر الافتراضي للمصباح إضافة إلى أنه يحتاج إلى وقت كي يبرد بعد كل إطفاء قد تصل في بعض المصابيح إلى 10 دقائق وهذا كله يعني أن هذه المصابيح لا تصلح في الأماكن التي تعاني من اهتزاز الجهد.

التأثير على المكثفات

معلوم أن هناك عدة أهداف من وضع المكثفات بالدائرة منها تحسين معامل القدرة عن طريق تغذية الحمل بجزء كبير من الـ Reactive Power التي يحتاجها. لكن المشكلة عند انخفاض الجهد إلى 90% من قيمته فإن الـ Q المولدة من المكثف تنخفض إلى 81% (تناسب مع مربع الجهد) ، وهذه مشكلة كبيرة إذ أننا وضعنا المكثف ليساعدنا في رفع قيمة الجهد فإذا به يتأثر هو نفسه سلبيا بانخفاض الجهد.

التأثير على الأجهزة المنزلية

بعض الأجهزة المنزلية التي لها محركات ثابتة القدرة تتأثر بشدة بانخفاض الجهد ، فمن المعلوم من أساسيات القوى أن $(P = V \times I \cos \phi)$ ، ومن ثم فأى انخفاض بأى نسبة في الجهد سيؤدي بالضرورة إلى ارتفاع في التيار بنفس النسبة. والمشكلة أن هذا الارتفاع غالبا لا يكون كبيرا ، فلو فرضنا أن هذا الارتفاع في التيار كان بنسبة 10% فقط ، فهذا يعني أن الـ CB لن يشعر بهذه الزيادة في التيار وبالتالي لن يفصل الدائرة ، في حين سيظل الجهاز يعاني من هذه الزيادة و من ثم ترتفع درجة حرارته تدريجيا مع الزمن حتى يصل لمرحلة الاحتراق. ومن هنا جاءت أهمية التأكد من عدم هبوط الجهد عن القيم القياسية المسموح بها.

27.12.7 وسائل الحماية من انخفاض وتغير الجهد (شبكة الجهد المنخفض)

قد يكون التغير في الجهد صغيرا بحيث لا تسبب أى مشاكل للمعدات ولكن في بعض الأجهزة الإلكترونية الحساسة فإن أى تغير في الجهد يؤدي إلى انهيارات وتشغيل خاطئ. ولذلك اهتمت الصناعة بتصميم وتصنيع أجهزة الحماية لعلاج هذه المشاكل مثل:

1. مكيفات القدرة (Power Conditioners)
2. منظمات الجهد (voltage regulator)
3. مولدات الطوارئ (emergency power generators)
4. نظم البطاريات الاحتياطية (battery backup) أو UPS.

27.12.8 استخدام أجهزة الـ Power Conditioners

تقوم الـ Power Conditioners بعمل عزل كهربى وتخفيض التشويش (electric noise) وفى بعض الوقت تعمل على تنظيم الجهد (voltage regulation). والمبدأ العام يتضح من الشكل 28-34 .

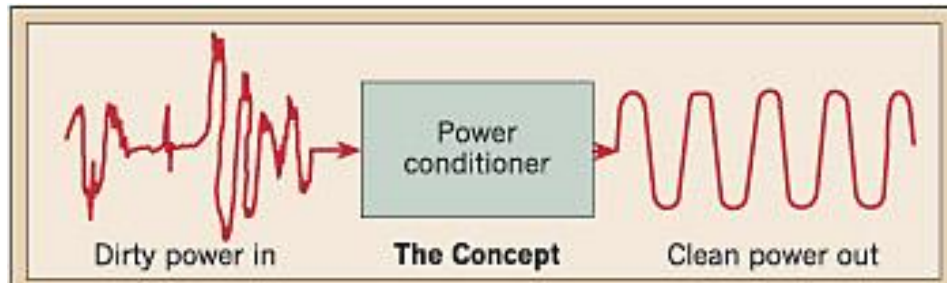


Figure 27-34 Power Conditioners

ومن أمثلة أجهزة الـ Power Conditioners مايلى:

1- محولات العزل (Isolation Transformer):

تعتبر المكون الرئيسى للـ Power Conditioners ويحتوي على مجموعتين من الملفات مرتبطتين بقلب مغناطيسي مشترك. وهذه الملفات مفصولة عن بعضها بواسطة تحجيب مغناطيسي (magnetic shielding). هذا التحجيب يخفض أو يمنع التشويش الكهربى للحالة العادية وذلك بتحويله إلى نظام التأريض .

2- منظمات الجهد (voltage regulator)

فكرة عمله أنه يقوم بمراقبة مستوى الجهد المغذى لحمل معين ، ويعزز جهد الدخول بغرض تصحيحه إلى حدود محددة مسبقا. ويمكن أن يكون أحد مكونات الـ Power Conditioners أو منفصلا عنه.

وسائل تنظيم الجهد:

1- نقط تقسيم الجهد يدويا/أوتوماتيكيا Manual/Auto Tap switches regulator

2- منظم جهد رنين حديدي Ferro resonance Regulator

3- مولف شكل موجه إلكتروني أو مغناطيسي Magnetic synthesizers

فالنوع الأول يعرف بمفاتيح التقسيم (tap- switchers) و التى تعالج التغير الكبير فى جهد المدخل مثلا من 80 إلى 145 فولت ، بينما تحافظ على جهد المخرج بين 110 و 125 فولت (الأرقام حسب النظام الأمريكى). وتكون الاستجابة الزمنية حوالى دورة واحدة ، وهذه فترة طويلة نسبيا و يمكن أن تسبب مشاكل لبعض الأجهزة .

والنوع الثانى هو منظم الرنين الحديدي ، وهو أفضل منظم جهد للمدخل (Ferro resonant regulators) فهذا النوع يحافظ على استقرار المخرج بدرجة أفضل ، وله استجابة زمنية أسرع .

وفكرة عمل محول الرنين الحديدي Ferro resonant/Constant voltage transformer هي استخدام محول صغير في حدود 500VA ذو نسبة تحويل 1:1 ، بحيث يحدث له Excitation بدرجة عالية حتي يصل إلى درجة التشبع (saturation curve) ، فيعطي (output voltage) لا يتأثر بشكل ملحوظ بالجهد الداخل إليه ولذا يسمى أيضا بالمحول ثابت الجهد (Constant-Voltage Transformers(CVTs))

3- نظم البطاريات الاحتياطية

وتستخدم نظم البطاريات الاحتياطية لتغذية الأحمال الحرجة عن طريق مصدر طاقة كهربائية مستمر Uninterruptible power supply (UPS) ، وعند تقلب مصدر التغذية الأساسي أو عند فصله فإن الـ UPS يغذي هذا الحمل من نظام البطاريات حتي يظل نظام الحمل مستمرا و لمدة تعتمد على خصائص البطارية الداخلية. والـ UPS نوعان :

On-line UPS

في هذا التصميم (شكل 28-35) تتم تغذية الحمل طوال الوقت من خلال الـ UPS ، وعند انقطاع الطاقة تتم تغذية الـ inverter من خلال البطاريات ويواصل تغذية الحمل .

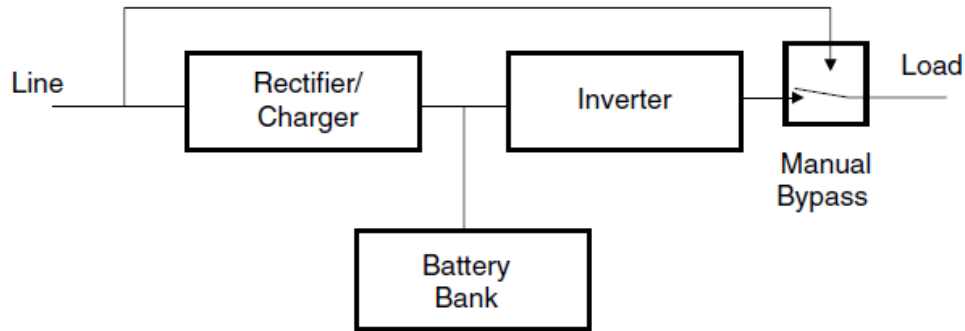


Figure 27-35 On-Line UPS

Standby UPS (Off-line UPS)

في هذه الحالة (شكل 28-36) تتم تغذية الحمل عن طريق مصدر التغذية الرئيسي ، فإذا حدث انقطاع في هذا المصدر تتحول التغذية لتتم عن طريق الـ UPS ، وتتم هذه العملية عن طريق ATS (Automatic Transfer Switch) . ويجب أن يعمل الـ ATS بسرعة كبيرة تصل إلى 4 ms حتي لا تتأثر الأحمال.

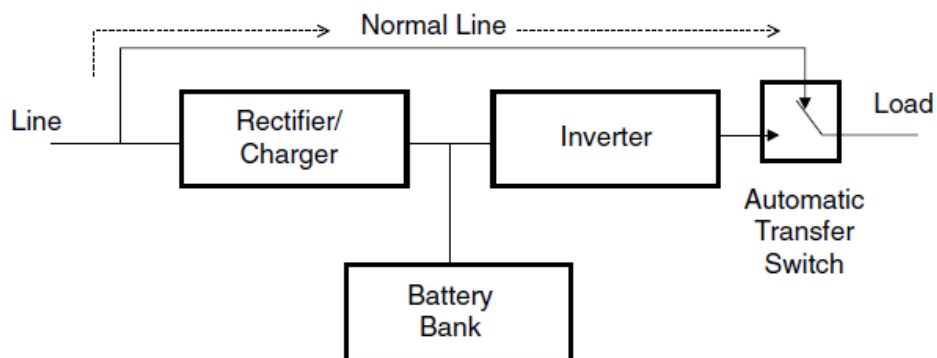


Figure 27-36 Off-Line UPS

28

استقرار منظومة القوى الكهربائية

POWER SYSTEM STABILITY

تعد دراسات الاستقرار Stability جزءاً أساسياً من دراسات التخطيط طويلة الأمد لنظم القدرة الكهربائية ، خاصة أنه مع توسع الشبكة الكهربائية وامتدادها على مناطق جغرافية واسعة أصبح من الصعب المحافظة على التزامن Synchronization بين مختلف الأجزاء للمنظومة الكهربائية ، ومعلوم أن فقدان هذا التزامن بين أجزاء الشبكة هو السبب الرئيسي لحدوث الـ Blackout الذى يمكن أن يضرب الشبكة.

28.1 ماذا نقصد بالاستقرار STABILITY

ووفقاً لتعريف IEEE – CIGRE فإن الاستقرار Stability هو قدرة النظام على العودة إلى شروط التشغيل الطبيعية بعد تعرضه لاضطراب Disturbance معين كما فى الشكل 1-29 .

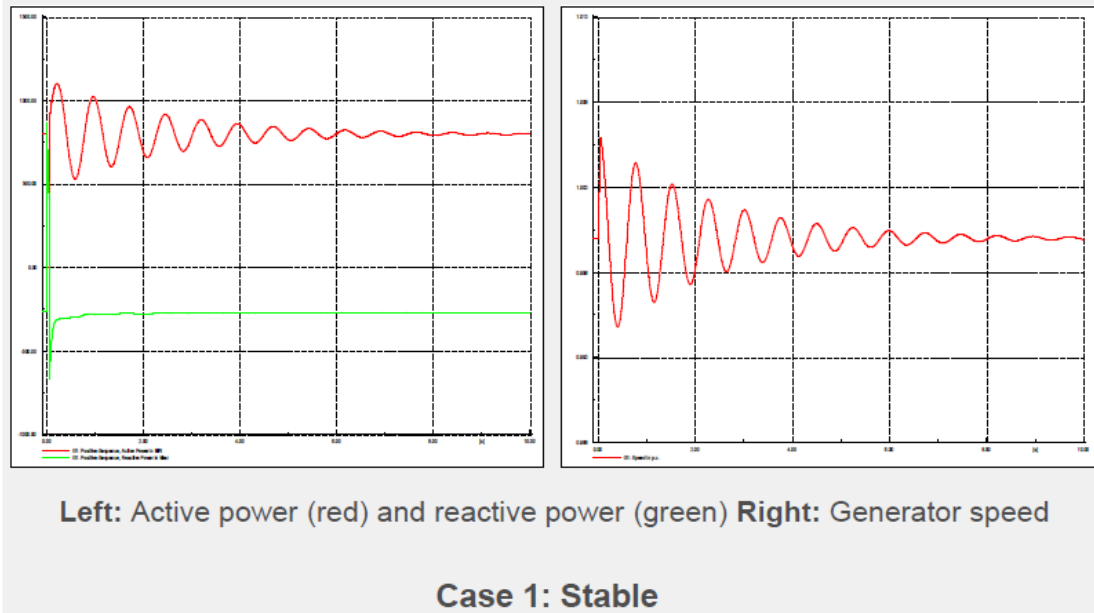


Figure 28-1

فكما هو واضح من الشكل فقد حدث اضطراب ما في المنظومة وتغيرت قيمة الـ P and Q وكذلك السرعة لكن المنظومة في خلال ثواني رجعت مرة أخرى إلى القيم الطبيعية ، فهنا نقول أن هذا النظام Stable .

ويقصد بالظروف الطبيعية هنا أن تكون عناصر الـ Power System الرئيسية الثلاثة وهي :

- Frequency
- Rotor Angle/ Power Angle
- Voltage

أن تكون جميعا ضمن قيم مقبولة حسب قيم الضبط من قبل مشغلي النظام وبهذا تبقى الشبكة بشكل عام مستقرة ، وبدون أن يؤدي هذا الاضطراب إلى تفعيل تجهيزات الحماية والتحكم ، وهو التفعيل الذي قد يترتب عليه فقدان بعض الأجزاء الرئيسية من النظام أو تجزئة الشبكة إلى جزر Islanding وهو الإجراء المتبع عادة لتجنب حدوث الانهيار الكامل للنظام .

فأما الجهد والتردد فقيمتهم محددة ومعروفة في الشبكة ، وأما قيمة Rotor angle فكما سنعلم لاحقا هي قيمة يمكن أن تتغير على مدى من صفر إلى 90 درجة ويظل النظام مستقرا ، وكلما كانت بعيدة عن 90 درجة كلما كان الـ Stability margin واسعا ، وهذا يعني أن المنظومة قادرة على استيعاب الهزات.

28.2 دلالات استقرار الشبكة

يعتبر استقرار منظومة القوى واحدا من أكبر التحديات التي تواجه الشبكات الكبيرة Interconnected Networks وتزداد المشكلة تعقيدا كلما زادت محطات توليد وزادت الخطوط و الأحمال ، لأن هذه الشبكة معرضة للكثير من الأعطال ومعرضة أيضا لتغيرات في ظروف التشغيل ، وهنا يظهر السؤال الرئيسى :

هل الشبكة سيمكنها تجاوز تأثير هذه الاضطرابات وتعود سريعا إلى حالة التوازن والاستقرار؟

وللإجابة على هذا السؤال نحتاج أولا لتحديد بدقة أهم الدلائل على استقرار الشبكة وهى :

- 1- أن يكون حجم الأحمال المركبة على الشبكة + Loss = حجم التوليد متاح
- 2- أن تكون جميع المولدات المركبة على الشبكة فى حالة عمل متزامن Synchronized مع بعضها البعض
- 3- أن يكون التردد Frequency مستقرا حول قيمته الاسمية (50/60 Hz) فى أى نقطة بالشبكة
- 4- أن يكون الجهد عند كافة الـ BBS فى الشبكة قريب من قيمته الطبيعية
- 5- أن تكون جميع الخطوط والكابلات والمحولات والمولدات وغيرها تعمل جميعا وهى محملة بقيمة أقل من أو قريبة من القيمة المقننة لها بحيث يمكن أن تسمح بالزيادة ولكن لمدة وجيزة.

وبالتبع فالاستقرار بالشروط السابقة قد لا يتحقق فى الشبكة لأكثر من عدة دقائق ، فالشرط الأول على الأقل قد يتغير تقريبا كل عدة ثوانى نتيجة تغير الأحمال ، وبقيّة الشروط كذلك قد تتغير تغيرا بسيطا مع تغير الأحمال أو فى بعض الظروف قد تتغير تغيرا دراماتيكيا نتيجة حدوث عطل مثلا بالشبكة. والاضطراب Disturbance الذى يحدث فى الشبكة قد يستمر لمدة وجيزة أو لمدة طويلة Short and long term disturbance .

28.3 أهم المصطلحات والتعريفات

طبقا لتصنيف الـ IEEE ، فإن الدارس لموضوع الـ Stability عليه أن يوجه نظره إلى ثلاثة أنواع من الدراسات الخاصة بموضوع الاستقرار وهى :

1. استقرار التردد
2. استقرار الجهد
3. استقرار Rotor angle

وكل نوع من الأنواع السابقة له تصنيفات فرعية . ويبين الشكل 29-2 تصنيف عناصر استقرار نظم القدرة الكهربائية أخذاً في الاعتبار أنواع الاضطرابات المختلفة حجماً وزمناً. وفيما يلي شرح سريع لمعنى كل نوع من أنواع الـ Stability السابقة.

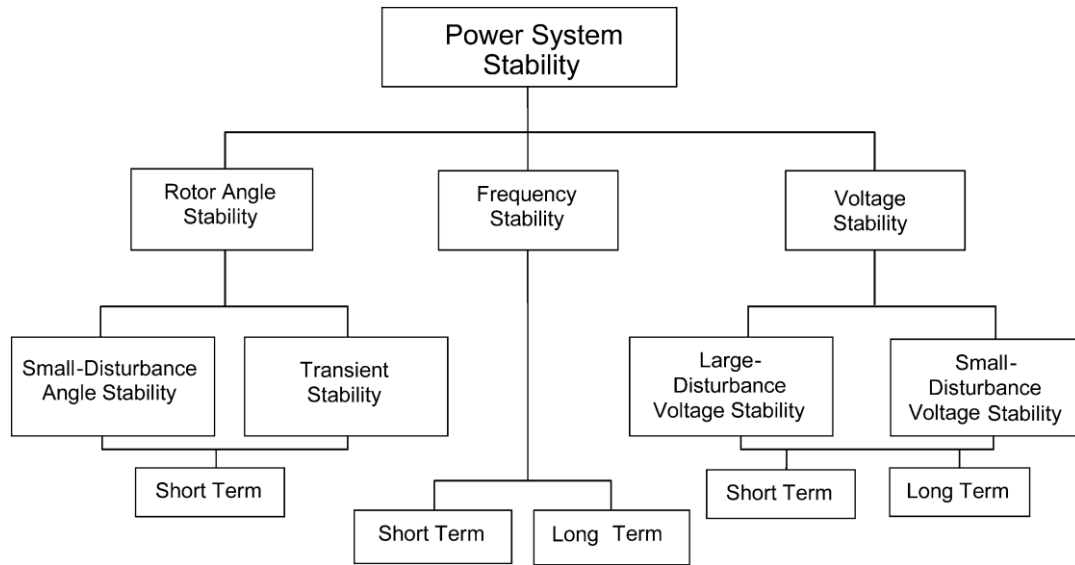


Figure 28-2 IEEE Stability Classification

28.3.1 مفهوم الاستقرار Rotor Angle Stability

والمقصود بالـ Rotor Angle Stability هو قدرة Synchronous Machines الموجودة بالنظام على البقاء في حالة التزامن Synchronism بعد حدوث اضطرابات ، مع القدرة على الحفاظ أو استعادة التوازن بين العزم الكهرومغناطيسي و العزم الميكانيكي عند كل Synchronous Generator موجود في النظام عند حدوث اضطراب في المنظومة.

وبناء على قيمة هذا الاضطراب في العلاقة بين العزم الكهربى والميكانيكى المؤثران على دوران المولد سيكون لدينا نوعين من الدراسات :

- فالاضطراب البسيط small disturbance يدرس تحت عنوان Steady State Stability
 - أما الاضطراب المفاجئ والشديد large disturbance فيدرس تحت باب Transient Stability
- أما عدم الاستقرار Instability فهو أن تخرج الشبكة Out Of Step أو يحدث فقدان للترزامن out of synchronism

28.3.2 مفهوم الاستقرار الترددي Frequency Stability

التردد هو ترمومتر العلاقة بين التوليد المتاح بالشبكة ، والأحمال المتصلة بالشبكة.

والمقصود هنا هو قدرة النظام على معالجة النقص في القدرة المتاحة Power Deficit أو بمعنى آخر علاج الاختلاف بين قيم التوليد المتاحة وقيم الأحمال المركبة ، والذي بناء على حجمه سيكون لدينا درجة ما من درجات عدم استقرار في التردد .

28.3.3 مفهوم الاستقرار الجهد Voltage Stability

ويقصد بها قدرة النظام على المحافظة على قيم الجهد ثابتة قدر المستطاع قريبا من القيم الاسمية بعد حدوث Disturbance بالشبكة . و غالبا تكون الدراسة في هذا الموضوع تتعلق بالأحمال ، وتدور أغلب الحلول حول سبل تعويض النقص في القدرة غير الفعالة Q لأن التغير فيها سيترتب عليه تغير في قيمة الجهد (تذكر أن جهد المولد نتحكم فيه من خلال التحكم في الـ Field من خلال زيادة أو نقص الـ Q) .

وهذا الاضطراب في الجهد :

- قد يكون صغيرا فيدرس تحت عنوان : Steady-state voltage stability
- وقد يكون اضرابا كبيرا فيدرس تحت عنوان : Dynamic Voltage Stability

ويمكن في تلخيص سريع لما سبق أن نقول :

- 1- أن دراسة الـ Rotor Angle Stability تهتم بوضع المولدات المتزامنة بالنظام والتوازن الـ Electric-torque ، وبين الـ Mechanical Torque في هذه المولدات
- 2- أما دراسة الـ Frequency Stability فتهتم بدراسة سداد العجز في القدرة الفعالة Active Power بالنظام مع تحقيق أقل فصل ممكن في الأحمال.
- 3- وأما دراسة الـ Voltage Stability فتهتم بدراسة سداد العجز في القدرة غير الفعالة بالنظام Reactive Power.

28.3.4 صعوبة دراسة موضوع الاستقرار Stability

منظومة الـ Power System عموما مصممة على أن تكون Stable خلال الاضطرابات التي تحدث كثيرا ، لكن بالطبع لا يمكن أن تصمم منظومة وتكون Stable تحت كافة ظروف التشغيل . وصعوبة دراسة هذا الموضوع تكمن في سببين :

1- السبب الأول هو أن منظومة الـ Power system يمكن وصفها بأنها Non-Linear System وهذا يعنى أنه إذا تعرض النظام لعدة متغيرات فإن استجابته System Response لهذه المتغيرات ليست بالضرورة أن تكون مماثلة لمجموع استجاباته لكل متغير على حدة ، كما هو الحال فى الـ Linear System وهذا ما يعقد الموضوع أكثر ، لأن توقع أداء الـ Non-Linear System ليست بالسهولة كما فى حالة الـ Linear System.

2- السبب الثانى أن استجابة الـ Power System لأي Disturbance ليس فقط معقدة رياضيا كما فى السبب الأول ولكن أيضا معقدة من حيث سعة انتشار ، فتأثير أى عطل يطال العديد من عناصر منظومة القوى ، فحدوث عطل Short circuit مثلا على خط ثم فصل هذا الخط بواسطة أجهزة الوقاية وعزله بفتح الـ Circuit Breakers الخاصة به سترتب عليه تغير فى الـ Power flow فى العديد خطوط الشبكة ، وهذا قد يؤدى إلى حدوث تغييرات فى قيم الجهد عند بعض الـ BBS وقد يؤدى ذلك إلى تشغيل بعض الـ Voltage Regulators ومن ثم قد تتغير أيضا سرعة بعض المولدات فينشأ عن ذلك تغييرات فى Frequency وتدخل من الـ Governors . ومن ثم فعطل واحد دفعنا إلى دراسة الأنواع الثلاثة من أنواع الـ Stability .

وفيما يلى ندرس تفصيلا الأنواع الثلاثة لدراسات الاستقرار .

النوع الأول من دراسات استقرار الشبكة:

28.4 دراسة الـ Rotor Angle Stability

معلوم أن المولد الكهربى يوجد داخله مجالان مغاطيسيان :

1- الأول ويسمى Rotor Magnetic Field ، وينشأ هذا المجال من دوران الـ Rotor - الذى يحمل أقطابا مغناطيسية - بواسطة القوة الميكانيكية الخارجية (البخار مثلا أو المياه المندفعة من السدود).

2- الثانى يسمى Stator Magnetic Field ، وهذا نشأ من ظهور الـ Three phase voltages والذى نشأت حسب قوانين فرداى داخل الـ three phase windings ومايترتب على ذلك من مرور التيار ، ومعلوم أن مرور Three phase currents داخل three phase windings سوف يولد Rotating field .

و قوة المجال الثانى تتوقف على شدة التيار المسحوب من المولد وهذا بالطبع يتوقف على قيمة الحمل الموصل عليه ، كما أن سرعة دوران المجال الثانى - و تسمى Synchronous speed, N - تتوقف قيمتها على عدد الاقطاب P فى الماكينة والتردد F الخاص بالمصدر حسب العلاقة

$$N = 120 F/P$$

بمعنى آخر ، فإنه عند دوران الـ Rotor بعزم ميكانيكى (Mechanical) T ، فإنه ينشأ مجالا مغناطيسيا يسمى بالـ Rotor magnetic field ، وهذا المجال سيقطع الملفات الموجودة فى الـ Stator فينشأ فيها جهدا حسب قوانين فرداى ، وهذا الجهد سينتج عنه مرور تيارات فى الحمل الكهربى الموصل على المولد ، وهذه التيارات تنشأ مجالا مغناطيسيا جديدا معاكسا للمجال الأول هو الذى نسميه بالـ Stator magnetic Field ، تتوقف قوتها على قيمة الحمل الكهربى الموصل على المولد.

28.4.1 تعريف زاوية الـ Rotor Angle

وفى الظروف الطبيعية يكون الـ T (Mechanical) = T (Electric) ، ويكون كلا المجالين المغناطيسيين : الـ Rotor magnetic field ، والـ Stator magnetic Field يدوران بنفس سرعة الـ Synchronous speed, N ، ولكن توجد بين الـ Rotor field وبين الـ Stator field زاوية هى التى نسميها **Rotor angle** مع التأكيد مرة أخرى على أنهما يدوران بنفس السرعة وهناك فقط Phase shift بينهما.

28.4.2 التحكم فى الـ Rotor Angle

يمكن التحكم فى الـ Rotor Angle، عن طريق التحكم فى القدرة الميكانيكية الداخلة إلى الـ Rotor من التربينات البخارية مثلا ، ، فإذا زادت هذه القدرة الميكانيكية الداخلة فإن الـ Rotor تزداد سرعته ومن ثم تتغير الزاوية الموجودة بين الـ Rotor and Stator Fields ثم تعود السرعة للقيمة الطبيعية ولكن بعد حدوث التغير المطلوب فى الزاوية.

لاحظ أنه عند زيادة حمل كهربى سيزداد التيار وهذا سيؤدى إلى كون $T(\text{Electric}) > T(\text{Mechanical})$ فنقل سرعة الـ Rotor وهنا يتدخل الـ Governor ليضخ بخارا أكثر ، أى قدرة ميكانيكية أكبر فتزداد سرعة دوران الـ Rotor ويعود مرة أخرى لتتساوى سرعته مع سرعة دوران Stator Field لكن بفرق زاوية بينهما أكبر من المرة السابقة ، ومن ثم يجب أن يكون واضحا أننا حين نقول "زيادة سرعة الـ Rotor" فهذا لايعنى أبدا أنه سيدور بسرعة مختلفة عن سرعة Stator Field لكن المقصود أنها زيادة مؤقتة أو هى زيادة السرعة التى انخفضت أصلا بسبب زيادة الأحمال حتى تتغير قيمة Power angle ومن ثم يمكن نقل قدرة أكبر .

28.4.3 تأثيرات ناتجة عن تغير الـ Rotor Angle

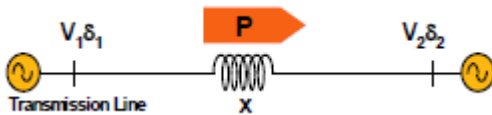
ويترتب على تغير قيمة الـ Rotor Angle لمولدات موجودة فى جهة ما من خط نقل حدوث تغير أيضا فى

قيمة ما نسميه بالـ **Power Angle** وهى الزاوية

التي تظهر فى المعادلة المشهورة التى تحدد قيمة القدرة المنقولة Transfer Power Capacity بين

محطتين لهما جهد V_1 and V_2 ويربط بينهما

Transmission Line له معاوقة قدرها X .



$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12}$$

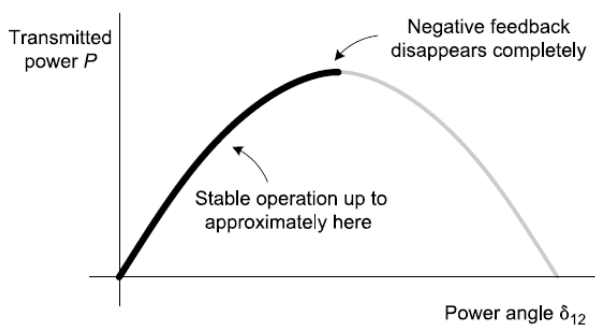


Figure 28-283

فالزاوية δ_{12} هى التى تعرف بالـ Power

Angle وكلما زادت هذه الزاوية كلما زادت القدرة

المنقولة بين المحطتين ، وتغير هذه الزاوية

يحتاج لتغيير الـ Rotor angle فى مولدات

إحدى المحطتين عن طريق تغيير القدرة

الميكانيكية الداخلة لهذا المولد.

مع ملاحظة أننا يجب ألا نسمح بزيادة هذه الزاوية أكثر من 90 درجة (الزاوية الحرجة) لأنه بعدها تتسبب زيادة الزاوية في انخفاض القدرة المولدة كما هو واضح من الشكل 29-3.

28.4.4 صعوبة الدراسات المرتبطة بتغير الـ Rotor Angle

عند حدوث تغير كبير نتيجة خروج محطة توليد مثلاً أو حدوث أى عطل مؤثر ، ففي هذه الحالة يكون العلاج صعباً بسبب حدوث اضطرابات كبيرة فإن فروق الزوايا Rotor angles للمولدات قد تكون كبيرة لدرجة تؤدي إلى خروج المولدات عن التزامن ، وقد نحتاج إلى Load shedding لإعادة التزامن بين وحدات التوليد المركبة على الشبكة وهذه الظاهرة أو هذا النوع من الدراسات يسمى بالـ Transient Stability . وبالطبع فالـ Transient Stability هو الأخطر والأهم لأنه قد يترتب عليه حدوث عدم تزامن بين وحدات التوليد .

ومشاكل الـ Transient stability معقدة لأنها تحدث خلال أقل من ثانية واحدة وتؤثر بشدة على المولد القريب من مكان الاضطراب. وهي أصعب أنواع الدراسات من وجهة النظر الرياضية لأننا نحتاج لتمثيل النظام بواسطة مجموعة من المعادلات التفاضلية الغير خطية (لأن التغير يحدث في زمن ضئيل جداً) على عكس النوع الأول من الدراسات (Steady State Stability) التي نستخدم في تمثيل النظام مجموعة من Linear Equations. وعموماً ، فالـ Rotor angle Stability هو الأقدم من حيث الاهتمام به ومن حيث الدراسات التفصيلية الخاصة به ، فالنوعين الآخرين (استقرار التردد ، واستقرار الجهد) لم يظهر الاهتمام بهما إلا بعد ظهور مشاكل Power Quality ، ومع ازدياد تعقد الشبكات .

والجزء التالي يشرح بمزيد من التفصيل موضوع Transient Stability من خلال ما يعرف بالـ Equal Area Criteria والتي تمثل طريقة لفهم وتوقع تصرف النظام عند حدوث Transient Stability .

28.5 استخدام الـ Equal Area Criteria

28.5.1 مفهوم الـ Equal Area Criteria

لنفترض أن لدينا مولد كبير (الشبكة) يغذى موتوراً ضخماً يتصل بأحمال ميكانيكية. ونريد أن ندرس هنا استقرار حالة المولد (تحديداً Rotor angle stability) عند حدوث تغير في الأحمال الميكانيكية المتصلة على الموتور. والشكل 29-4 يمثل علاقة القدرة الكهربائية من المولد وعلاقتها بالـ Rotor angle, δ .

في الشكل السابق نجد الحمل المبدئي الميكانيكي المتصل على الموتور هو Initial Output, P_0 مرسوماً عند نقطة a في الشكل ، و زاوية القدرة تساوى δ_0 ، والنظام حتى الآن يعتبر مستقراً ، فالقدرة الكهربائية الداخلة على الموتور تتساوى مع الحمل الميكانيكي المتصل به ، وأيضا الوضع مستقر لأن الزاوية δ لم تتجاوز 90 درجة وبالتالي فالمولد في وضع مستقر .

الآن نفترض حدوث زيادة مفاجئة في قيمة الحمل على الموتور ليصبح عند قيمة P_s Changed Output, كما في الشكل.

الآن ، لكي يظل الوضع مستقرا فلا بد من أن تزيد قيمة القدرة الكهربائية الداخلة على الموتور ، بمعنى يجب أن تنتقل نقطة التشغيل إلى النقطة b ، فكيف سيحدث ذلك؟

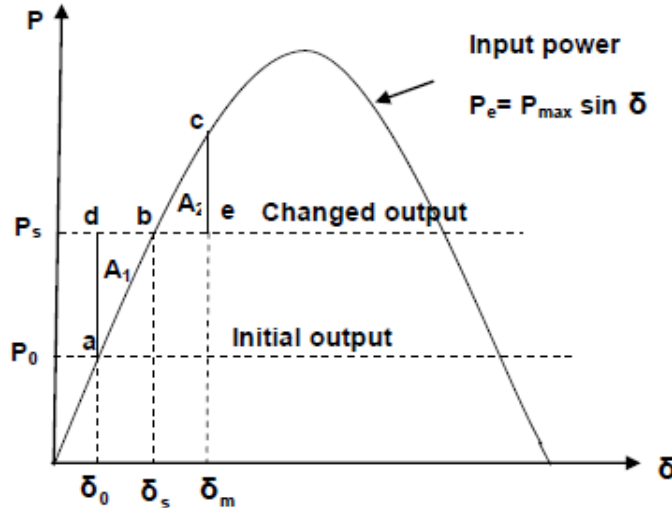


Figure 28-4 شرح مبدأ المساحات المتساوية

في الفترة الزمنية من نقطة a إلى نقطة b ونتيجة زيادة الحمل الميكانيكي فجأة بدرجة أكبر من القدرة الكهربائية الداخلة فسيحدث انخفاض في سرعة دوران المولد (de-acceleration) وهذا يعني انخفاضا في الجهد E (جهد التوليد يتناسب طرديا مع سرعة دوران المولد) ، وبالتالي يزيد التيار الداخل للموتور ($I = V - E/X$) وهذا يترتب عليه أن تزيد القدرة الكهربائية P_e ، وهذا يعني من الرسم أن زاوية القدرة δ_0 ستزيد لتصبح δ_s وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هي b والتي عندها أصبحت $P_e = P_m$.

بالطبع كنا سنكون سعداء لو انتهى الأمر عند هذا الحد ، لكن هذا الانتقال لن يكون سلسا ، بل سيحدث نوع من الـ Oscillation حول نقطة b التي كان يفترض أن يستقر عندها النظام حسب الحمل الجديد ، فالمشكلة أن تزايد السرعة لن يتوقف فجأة حين يصل إلى نقطة b بل سيستمر تزايد السرعة نتيجة Spinning Energy of heavy Rotor ومن ثم تزايد الزاوية حتى تصل إلى قيمة δ_m ، وتصبح نقطة التشغيل الجديدة هي النقطة c .

وكما هو واضح فقد نتج عن هذا التذبذب ظهور مساحتين A_1 and A_2 ، تقعان فوق وتحت القيمة الجديدة للحمل ، كما في الشكل. ويمكن أن نقول أن المساحة الأولى A_1 تتناسب مع قدرة النظام على تسريع الاهتزاز ، بينما المساحة الثانية A_2 تتناسب مع قدرة النظام على تباطؤ الاهتزاز.

ومبدأ المساحات المتساوية Equal Area Criteria ينص على أنه إذا تساوت المساحتان فإن النظام حتماً سيأخذ وقتاً ثم يستقر، أما إذا زادت مساحة A_1 عن مساحة A_2 فسيزداد التسارع ويتسع الـ Oscillations حتى تتجاوز الزاوية δ_m قيمة 90 درجة ويخرج النظام Out of Step .

وطبقاً لمبدأ المساحات المتساوية فإنه إذا كانت هاتان المساحتان متساويتان في الشكل 29-4 فسيحدث نوع من التذبذب حول نقطة b لكن سيستقر النظام في النهاية . وتفسير ذلك أنه خلال الفترة من b إلى c تكون P_e أكبر من P_m فتتزايد سرعة الموتور ، وبالتالي يزيد الجهد E ، وبالتالي يقل التيار (تذكر أن $I = V - E/X$) ، ومن ثم تقل القدرة الكهربائية الداخلة ، فتقل الزاوية δ وتتراجع في اتجاه النقطة b ويظل التذبذب حول النقطة b بالزيادة والنقصان حتى تستقر في النهاية نتيجة وجود Damping في المنظومة.

والشكل 29-5 يظهر ثلاث حالات مختلفة لهذه المساحات فالحالة الأولى Case-a وفيها $A_2 = A_1$ نجد النظام مستقر كما سبق شرحه ، وأيضاً في الحالة الثانية التي يكون فيها الاستقرار حرجاً لأن $A_1 = A_2$ لكن عند حافة منطقة الاستقرار ، بينما في الحالة الأخيرة Case-c نجده غير مستقر لأن $A_1 > A_2$.

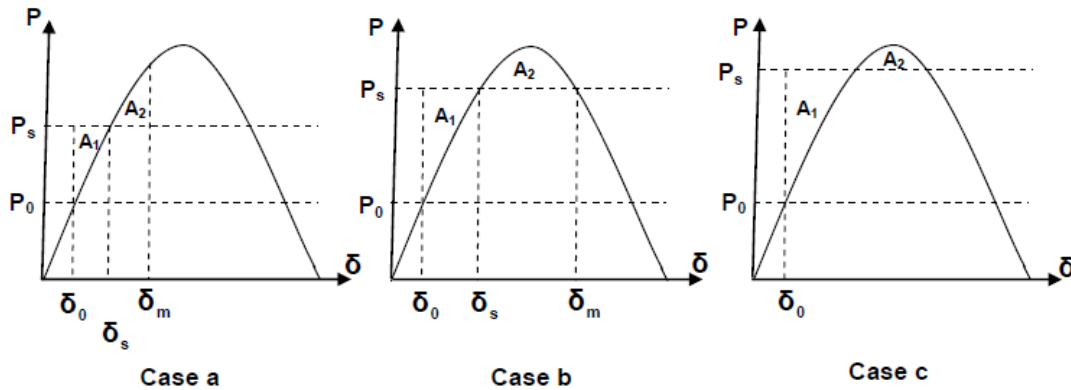


Figure 28-5 حالات مختلفة للمساحات

ومن خلال هذا المبدأ يمكن فهم وتفسير بعض الظواهر المؤثرة على استقرار الشبكة بصورة بعيدة عن المعادلات الرياضية كما في الأمثلة التالية.

28.5.2 تأثير وجود خطين متوازيين بين المصدر والحمل على الـ

Stability

في هذه الحالة سيكون لدينا منحنيان للقدرة المنقولة كما في الشكل 29-6:

- الأول وهو الأكبر يمثل القدرة المنقولة في وجود خطين

- والثانى وهو الأصغر يمثل القدرة المنقولة لو خرج أحد هذين الخطين

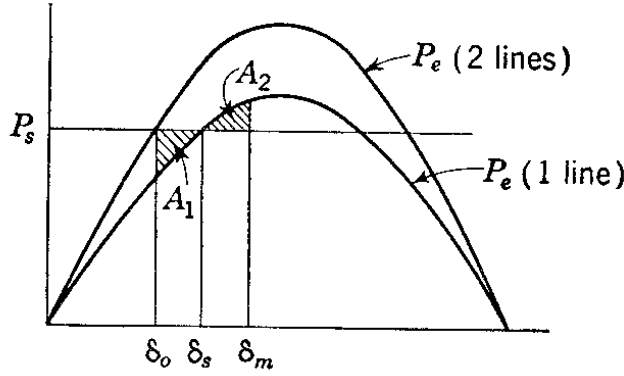


Figure 28-6 خروج خط من الخدمة

لاحظ أن الـ Power angle المطلوبة δ_o لتشغيل الحمل فى حالة وجود خطين أصغر بكثير من الزاوية فى حالة وجود خط واحد δ_s ، وهذا يعنى أن النظام فى وجود خطين أكثر استقراراً لأنه أبعد عن قيمة الـ 90 درجة التى تمثل stability margin .

كما أن التغيير فى الحمل فى وجود خطين يؤدي إلى حدوث تغيرات بالزيادة والنقصان حول قيمة زاوية القدرة ، هذه التغيرات تكون أصغر بكثير منه لو كان المستخدم هو خط واحد ، وهذا يعنى أن النظام قادر على استيعاب الهزات فى الحمل بدرجة أكبر لو كان هناك خطين.

ماذا يمكن أن نفعل لتجنب عدم الاستقرار عند خروج أحد الخطين؟

بالنظر للمثال المرسوم فى الشكل 29-6 سنجد أنه فى وجود خطين كان زاوية القدرة δ_o تساوى حوالى 25 درجة ، فلما خرج أحد الخطين أصبحت تقريباً 60 درجة ، أى اقتربت من الحد الأقصى للاستقرار ، وهذا يعنى أن لدينا احتمالاً ليس بالقليل أن الـ Oscillations المتوقع حدوثه لحظة خروج أحد الخطين يمكن أن يأخذ النظام إلى منطقة عدم الاتزان .

فعقب خروج أحد الخطين (وهذا يمثل نوع من أنواع الـ Disturbance التى يمكن أن تحدث) فيفترض أن يعمل النظام بزاوية جديدة هى δ_s ولكن لأننا نتعامل مع نظام ميكانيكى يحتاج إلى وقت للاستقرار بسبب الـ Inertia الموجودة فيه وبالتالي فإن هناك Oscillations سيحدث حول القيمة الجديدة للزاوية بحيث يمكن أن تصل زاوية القدرة لقيمة δ_m بالزيادة ، كما يمكن أن تصل إلى قيمة δ_o بالنقصان ، ومن ثم تظهر كما فى الشكل 29-7 مساحتين هما A1 and A2 قيمة كل منهما تتوقف على قيمة الزاوية التى يصل إليها الـ Oscillations.

فلو كان الحمل الموجود قبل فصل أحد الخطين عاليا (أو كانت قدرة نقل القدرة للخط المتبقى منخفضة) فعندها ستصبح $A_1 > A_2$ كما في الجزء الأيمن من الشكل 29-7 ، بينما لو كان الحمل أقل من قدرة الخط المنفرد فسنصل لحالة الاستقرار كما في الجزء الأيسر من الشكل.

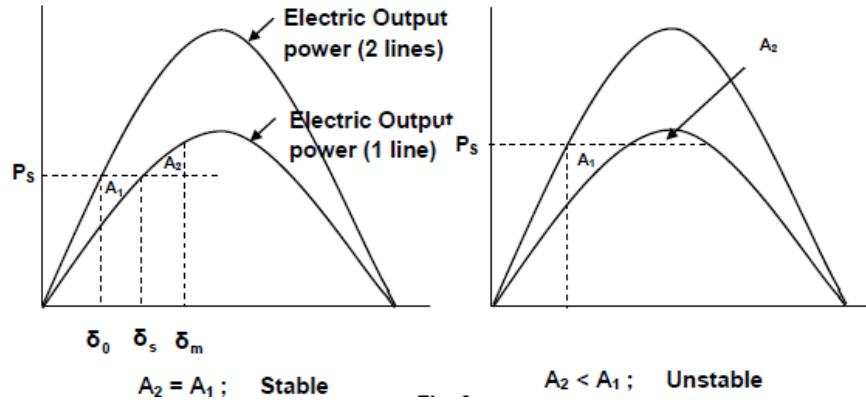


Figure 28-7 حالات خروج خط من الخدمة وتأثير ذلك على الاستقرار

ولتجنب ذلك يمكن مثلا أن نفصل بعض الأحمال قبل فصل أحد الخطين (هذا إذا كان الخروج مبرمجا وليس بسبب عطل مفاجئ).

28.5.3 تأثير سرعة فصل الأعطال على استقرار الشبكة

يمكن فهم هذه النقطة بعيدا عن الرياضيات المعقدة باستخدام مبدأ المساحتين المتساويتين كما في الشكل 29-8 . و الجزء العلوى منه يمثل نظاما كان يعمل عند زاوية δ_0 على المنحى الأول Pre-fault عندما كان لدينا خطين في الخدمة ، ثم انتقلت نقطة التشغيل بعد حدوث عطل إلى المنحى الأصغر During Fault حيث القدرة المنقولة محدودة جدا بسبب انخفاض الجهد أثناء العطل ، ثم بعد فصل الخط المعطل وبقاء خط واحد فسيحدث الاهتزاز حول النقطة δ_{cc} التي حدث عندها إزالة Clearing للعطل. وحيث أن $A_1 = A_2$ كما في الشكل فإن النظام في النهاية سيحدث له استقرار.

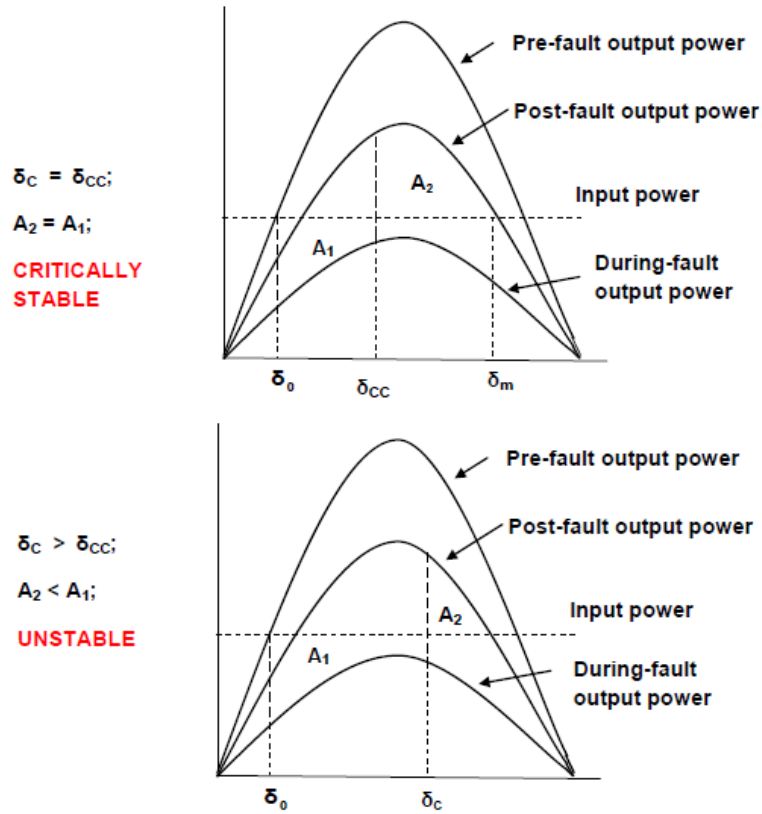


Figure 28-8 تأثير سرعة فصل الأعطال

بينما في الجزء السفلي من الشكل ، حدثت إزالة متأخرة للعطل (لاحظ كيف أن δ_c بعيدة جدا δ_0) ومن ثم أصبحت $A_1 > A_2$ ، فقطعا سينتهي الأمر بخروج النظام Out of step.

النوع الثاني من دراسات الاستقرار:

28.6 دراسة الاستقرار Frequency Stability

يعتبر التردد هو العامل الذي يوازن بين الـ Load output Power و الـ Generated input power،

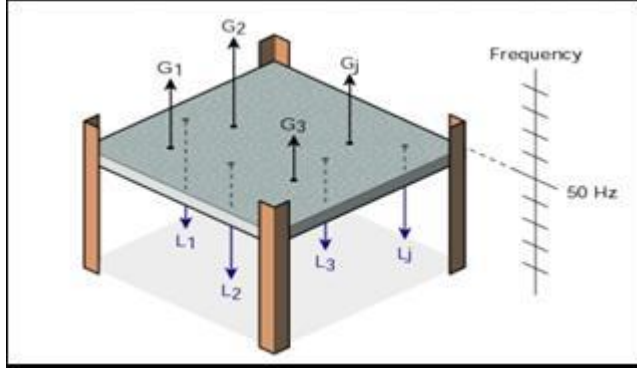


Figure 28-9 علاقة التوليد والأحمال والتردد

والشكل 29-9 يشرح العلاقة بين القدرة المتولدة والأحمال المتصلة بالشبكة من جهة ، وبين التردد من جهة أخرى ، فكما هو موضح فإن حدوث فصل لأحمال كبيرة بصورة مفاجئة (وهذا يكافئ ازدياد التوليد عن الحمل) فهذا يؤدي إلى حدوث زيادة في التردد . أما دخول أحمال زائدة على الشبكة بصورة مفاجئة أو لخروج بعض محطات التوليد فيؤدي إلى انخفاض التردد.

ومن ثم فالتردد هو ترمومتر الاتزان في الشبكة ، وعادة لا يسمح للتردد أن يقل عن 49.2 HZ أو يزيد عن 50.3 HZ. لاحظ المدى في شبكتي شرق الصين ووسط أوروبا في الشكل 29-10.

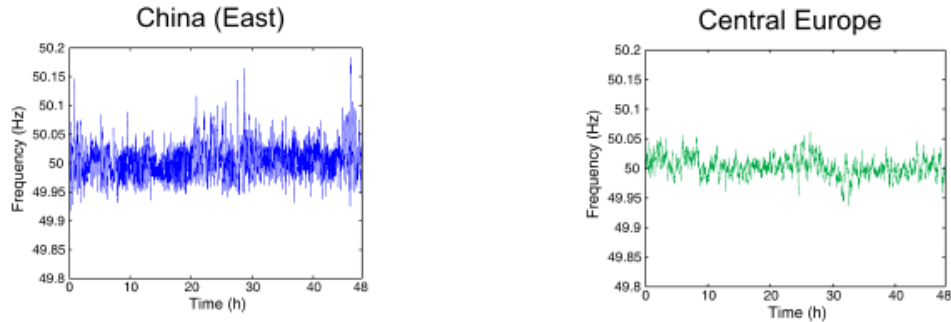


Figure 28-10 تغير طفيف في التردد في الشبكات الكبيرة

28.7 تأثير الـ Inertia على حجم التغير في التردد

تقاس الـ Inertia بمقياس Hz/MW وكلما صغر ذلك المؤشر كان ذلك يعني أن الـ Inertia كبيرة وأن المولد ضخم ، وكلما كان المولد كبيرا في الحجم كلما كان اتزانه أسهل كما هو واضح من الشكل 29-11 ، فإن فقد نسبة من التوليد تؤدي إلى نسبة تغير في التردد أصغر كثيرا في المولدات التي لها Inertia كبيرة. ومن ثم كان هذا العامل هاما جدا في توصيف المولدات.

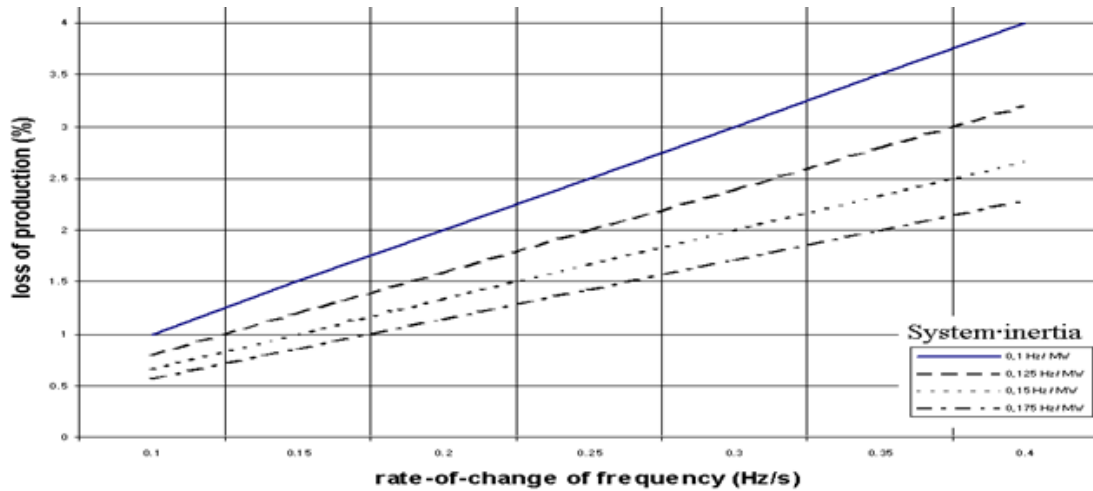


Figure 28-11 Effect of Generator inertia on the Stability

28.7.1 المجالات التي يتغير فيه التردد

يتغير التردد في Bands مختلفة على النحو الذي يظهر في الشكل 12-29 وتعريفها كالتالي:

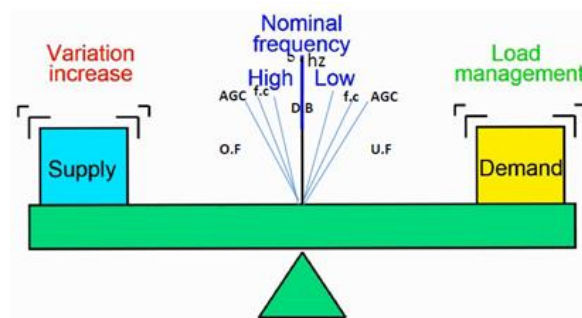


Figure 28-12 مجالات تغير التردد

DB: Dead Band -1

هو مجال يسمح فيه بتغير التردد دون رد فعل من الشبكة أو الوحدة

F.C: Frequency Correction -2

هو مجال يحدث فيه تغير في التردد و لكن هناك رد فعل تلقائي من خلال ال Governor

AGC: Automatic Generation Control -3

هو مجال يحدث فيه تغير التردد و لكن يكون رد الفعل عن طريق مركز التحكم القومي وأحيانا يكون من خلال المحطة نفسها.

UF: Under Frequency –4

هو مجال يحدث فيه انخفاض شديد في التردد مما يؤدي إلى فصل الأحمال Load shedding عن طريق مراكز التحكم بنسب معينة.

OF: Over Frequency –5

هو مجال يحدث فيه ارتفاع شديد في التردد مما يؤدي إلى فصل التوليد Blackout عن طريق منظومات الوقاية بالوحدة.

مع ملاحظة أن الحد المسموح به لتغير التردد وكذلك جدول فصل الأحمال يختلف من بلد لآخر. والجدول التالي يمثل حدود ونسب الفصل في مصر.

التردد Hz	نسبة فصل الحمل
49.2	2%
49.1	3%
49	4%
48.9	7%
48.8	20%
48.7	20%
48.6	22%

وتنشأ اضطرابات التردد دائماً بعد حدوث اضطراب في تغذية القدرة الفعالة كخروج محطة توليد كبيرة مثلاً أو انقطاع خطوط الربط معها.

28.8 كيف يمكن علاج مشاكل الـ Power Deficit؟

وكما ذكرنا ، فإن ثبات التردد شئ ضرورى في الشبكة لاستقرارها غير أن التغير في التردد شئ طبيعى ومقبول إذا كان في مدى صغير فإذا زاد عن ذلك فيمكن التحكم فيه بواسطة الـ Governor ، فإذا زاد مدى التغير فربما نصل إلى مرحلة فصل بعض الأحمال أو ما يعرف بـ Load Shedding ، فإذا زاد التغير جداً فسنصل إلى الفصل التام للأحمال Blackout.

28.8.1 مراحل التحكم فى التردد :

توجد عدة وسائل للتحكم فى تغيرات التردد ، بعضها سريع جدا والآخر يستغرق وقتا كما يلى :

: (1s to 15s) Primary control

عندما يحدث تغير كبير فى استهلاك الطاقة يقوم الـ primary control بتنظيم التردد بواسطة الـ governor. عند حد معين وليس بالضرورة إلى قيمته الثابتة .

:Secondary control (15s to 3min)

يستغرق وقت أكثر من الـ primary control ولكنه يقوم بإعادة التردد إلى قيمته الثابتة وهذا يحدث تلقائيا ولكنه متمركز بمعنى أن نطاقا محدود من حيث المساحة ، ولذلك فكل مولد يحتوى على primary control ولكن ليس كل مولد يحتوى على secondary control

: Tertiary control

يستغرق وقت أكثر من الـ secondary control ووظيفته استعادة التردد الأصلي للمولدات المتشاركة فى الـ secondary control عن طريق توزيع الأحمال بينهم أو عن طريق تشغيل مولد اضافى وهذا ممكن أن يحدث أوتوماتيكيا أو يدويا.

:Time control

هو آخر مستوى فى التحكم والذى يستغرق وقت أكثر من كل الأنواع السابقة وهو يقوم بقياس التردد كل يوم للتأكد أنه فى نطاق التغير المسموح به.

الشكل التالى يوضح الزمن المتاح لعناصر المراقبة والتحكم المختلفة قبل اتخاذ أى قرار.

Generator					
Primary Control and AGC	Economic Dispatch	Unit Commitment	Mid-Term Planning	Expansion Planning	
Seconds	Minutes	Hours	Days	Weeks	Years

الزمن المتاح لعناصر المراقبة والتحكم المختلفة

النوع الثالث من دراسات الاستقرار:

28.9 دراسة الـ Voltage Stability

حتى نهايات السبعينات كانت كل الكتب التي تدرس موضوع الـ Stability تدرسها من وجهة نظر استقرار عمل المولدات فقط ، من خلال دراسة التوازن بين العزم الكهربى والميكانيكى فى داخل المولد وهو النوع الأول من دراسات الاستقرار الذى سميناه بالـ Rotor angle stability. ثم بدأ الاهتمام يتزايد بنوع آخر من أنواع الـ Stability ، وهو الـ Voltage Stability ، وذلك مع تكرار حدوث عدة ظواهر جديدة على الشبكة آنذاك ، منها:

- Voltage Fluctuations
- Voltage Collapse

وبعد تحليل أسباب هذه الظواهر تبين أن دراسة الـ Voltage Stability لا تقل بل تزيد فى الأهمية عن دراسة النوع الأول من أنواع الـ Stability وأنه فى الغالب قد يكون سببا لمعظم حوادث انهيار النظام.

وسندرس هنا فقط المظهر الثالث بشئ من التفصيل لشدة خطورته .

وهذا النوع من الدراسة يهتم بدراسة العلاقة بين Demand and Load Supply .

وعلى عكس الـ Rotor Angle Stability التى تهتم بوضع المولدات المتزامنة فى النظام فإن الـ Voltage Stability يهتم بوضع الأحمال Loads فى النظام ، وأكثر التركيز يكون على دراسة سد العجز فى قيم القدرة غير الفعالة التى تحتاجها الأحمال المركبة فى المنظومة .

وأهمية هذه الدراسات تكمن فى أن الارتفاع أو الانخفاض فى الجهد قد يؤدى إلى فصل بعض أنواع من الأحمال أو بعض الخطوط بواسطة أجهزة الحماية وهذا بالتبعية قد يؤدى إلى هزات فى النظام منها ، كما يمكن أن تتأثر المضخات والمحركات ومساعدات محطة التوليد الأمر الذى قد يؤدى لخروج المولد نفسه من الخدمة ، وقد يترتب عليه حدوث الخروج المتتابع cascaded outage والذى يمكن أن يؤدى إلى حدوث Blackout .

وكما ذكرنا سابقا فجميع أنواع الـ Stability قد تحدث متتابعة فخرج مولد نتيجة Rotor angle instability يمكن أن يؤدى إلى حدوث انخفاض فى الجهد عند العديد من الـ BBS وهكذا.

28.10 أنواع الـ Voltage Stability

يوجد نوعان من الدراسات المتعلقة باستقرار الجهد:

1. Dynamic Voltage Stability
2. Static Voltage Stability

النوع الأول عبارة عن اهتزاز Fluctuation في الجهد نتيجة دخول أجهزة من النوع Fast acting devices مثل المحركات الحثية Induction Motors أو أجهزة HVDC والوقت المتاح لاستيعاب هذه الهزات في حدود 10-20 ثانية ، وهذا يصنف short term phenomenon.

أما النوع الثاني فيحدث لو كانت التغير الحادث في الجهد ناتج عن تغير بطيء في الحمل أو نتيجة تحميل زائد مثلا أو تغير في Tap Changing Transformers ففي هذه الحالات سيكون لدينا وقت في حدود عدة دقائق للتعامل مع الظاهرة وتصنف Long term phenomenon.

28.10.1 ظاهرة انهيار الجهد Voltage Collapse

وتعني أن جهد BB معين يصل للصفر فجأة بدون حدوث أى عطل مرئى أو مادي. فالمراقب العادى في هذه الحالة حين يرى أن الجهد وصل إلى الصفر فسيحكم لا محالة بأن هناك Short Circuit قد حدث بل وأن هذا القصر قريب جدا من الـ BB بحيث تسبب في هذا الانهيار السريع والكبير للجهد ، لكنه سيكتشف عدم وجود أى قصر ، والواقع أن السبب هو حدوث Voltage Instability أدى إلى حدوث انهيار للجهد Voltage Collapse كما سنرى.

28.11 أساسيات دراسة استقرار الجهد

ولدراسة هذا النوع من الاستقرار نحتاج دائما لدراسة بعض أنواع المنحنيات أهمها P-V and Q-V.

ولدراسة هذا الموضوع فإننا نبدأ بمنظومة صغيرة كما في الشكل 29-12.

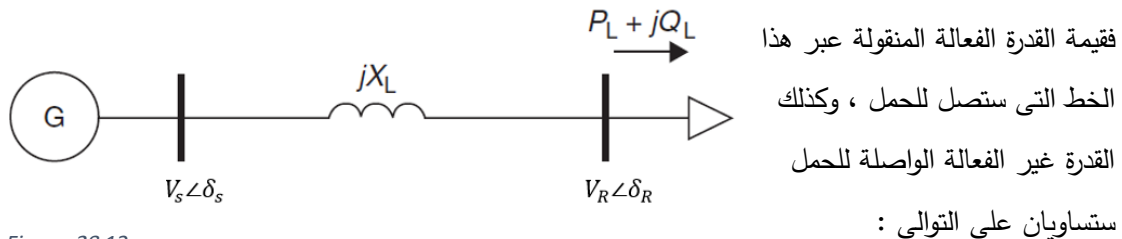


Figure 28-12

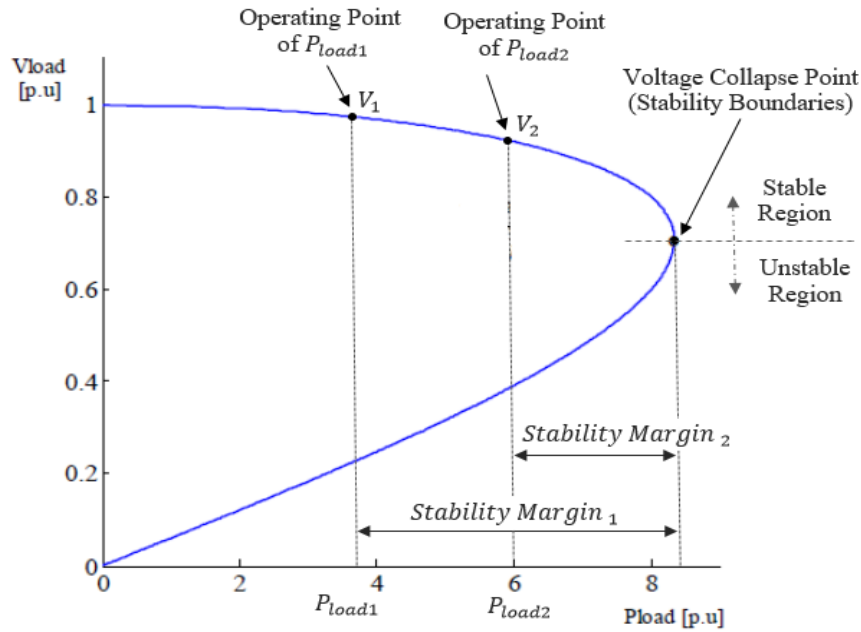
$$P_L = -\frac{V_S V_R}{X_L} \sin \delta$$

$$Q_L = -\frac{V_R^2}{X_L} + \frac{V_S V_R}{X_L} \cos \delta$$

بحل المعادلتين السابقتين بحثاً عن قيمة V_R وهي قيمة الجهد عن الحمل نحصل على المعادلة :

$$V_R = \sqrt{\frac{V_S^2}{2} - Q_L X_L \pm \sqrt{\frac{V_S^4}{4} - X_L^2 P_L^2 - X_L V_S^2 Q_L}}$$

وهذه المعادلة لها حلين وهذا واضح من رسم منحنى الـ $P-V$ فى الشكل 29-13 والذي يسمى فى معظم المراجع بالـ *Nose curve* أو منحنى الأنف. بمعنى أنه لكل قيمة للقدرة الواصلة للحمل (سواء كان Load1 or Load2) سيكون لدينا قيمتان للجهد المتوقع عند جهة الحمل إحداها فى الجزء العلوى من المنحنى والأخرى فى الجزء السفلى:



منحنى الأنف Figure 28-13

1- إحدى هاتين القيمتين (القيمة العلوية) تمثل نقطة التشغيل الطبيعية ، والجهد عندها ينخفض بزيادة التحميل ولكن بانخفاض طفيف مالم تتواصل الزيادة فى التحميل حتى يصل إلى جهد الانهيار ، حيث تتحرك هذه النقطة يمينا مع تزايد التحميل فيتناقص فى نفس الوقت ما يسمى بحد الاستقرار أو *Stability*

- Margin كما هو واضح في الشكل عند المقارنة بين نقطتي تشغيل Load1 و Load2 . بمعنى أنه كلما كانت نقطة التشغيل بعيدة عن نقطة الانهيار كلما زاد ما يعرف بالـ Stability Margin
- 1- وأما (القيمة السفلى) فغير مقبولة وتعتبر Unstable لأنها صغيرة جدا مقارنة بالقيمة الطبيعية ، و لو حدث ووصلت نقطة التشغيل - لو لحظيا - لهذه القيمة فسينهار النظام فورا بسبب تتابع و تزايد الانهيار الناتج عن تجاوز حد الاتزان حتى نصل إلى مرحلة الـ Voltage Collapse ويصل الجهد إلى قيمة تساوى صفرا. والسبب في ذلك أن أى قيمة على الجزء السفلى من المنحنى هي قيمة منخفضة جدا ويترتب على انخفاض قيمتها أن الحمل يسحب تيارا شديدا الارتفاع (دائما نفترض ثبات القدرة) وهذا سيؤدي إلى مزيد من الانخفاض للجهد بسبب الـ Voltage drop الهائل الذي سينتج من التيار ومن ثم ندخل في دوامة تنتهي بنا إلى قيمة جهد = صفر كما في الشكل.
- 2- معنى أن الجهد يساوى صفرا أن لدينا وضع يشبه حالة الـ Short Circuit دون أن يكون لدينا Short Circuit ، فالجهد غالبا لا يساوى صفرا إلا إذا اتصل الموصل بالأرض في حالة القصر، ولكن هذه إحدى مظاهر خطورة ظاهرة عدم اتزان الجهد أن نصل إلى وضع كارثي كما في حالة الـ SC دون أن يحدث SC حقيقي.

28.12 العلاقة بين الجهد و القدرة غير الفعالة

من المعادلة السابقة وصلنا إلى أن

$$V_R = \sqrt{\frac{V_s^2}{2} - Q_L X_L} \pm \sqrt{\frac{V_s^4}{4} - X_L^2 P_L^2 - X_L V_s^2 Q_L}$$

يمكن من هذه العلاقة رسم المنحنى الممثل للعلاقة بين الـ V_R وبين الـ Q كما في الشكل 14-29

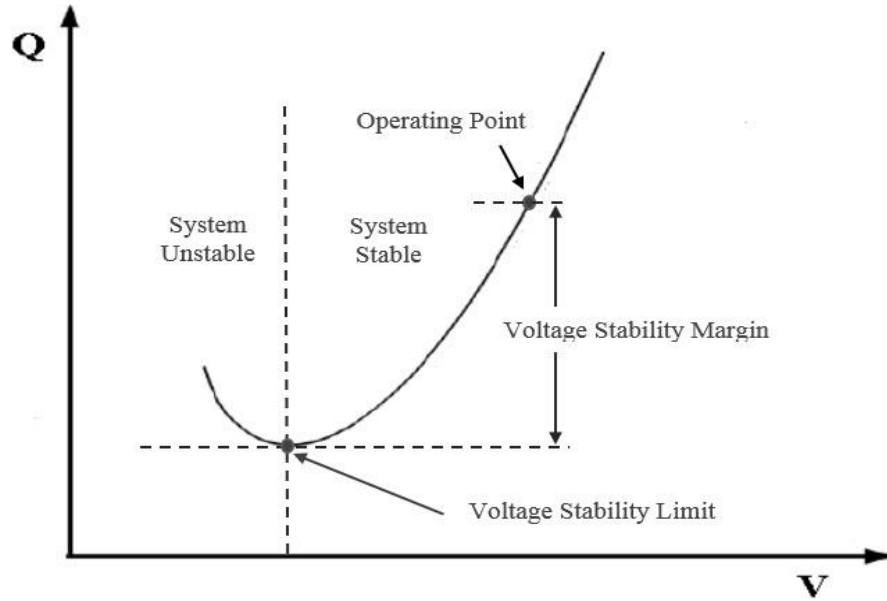


Figure 28-14 Q-V curve

والذى يتضح منه أن حدوث أى انخفاض فى قيم الـ Q المتاحة من المصدر سيصاحبه انخفاض فى قيمة الجهد والواصل للأحمال يمكن أن تتسبب فى حدوث Voltage collapse. أيضا.

أما المنحنى فى الشكل 15-29 فيمثل عدة مستويات للتحميل وتظهر فيها العلاقة السابقة بين الجهد وبين الـ Q المتاحة من المصدر ، ومنها يتبين أن الجهد يرتفع بارتفاع قيمة الـ Q المتاحة من المصدر ، وينخفض بانخفاضها عند ثبات قيمة الـ P ، وأن المشكلة دائما تكمن فى حدوث انخفاض حرج للـ Q المتاحة من المصدر أى عدم قدرة الـ Supply على توفير الـ Q المطلوبة مع ثبات القدرة الفعالة المسحوبة ، عندها سيحدث حتما انهيار للجهد Voltage Collapse . قارن ذلك بمنحنيات العلاقة بين الـ Active Power والجهد السابقة والتي رأينا فيها أن الانهيار للجهد يحدث مع الارتفاع فى التحميل للـ P .

والواقع أن أغلب حالات انهيار الجهد تحدث حين تقشل المنظومة فى توفير الـ Q الكافية للأحمال المركبة على الشبكة (وكان هذا هو السبب فى حدوث أكبر Blackout فى التاريخ ، والذى وقع فى أمريكا وتحديدا شمال شرق ، ووسط غرب أمريكا بالإضافة إلى مقاطعة أوناريو بكندا ، وكان ذلك يوم 2003/8/14) ، ومن ثم فنحن نخشى دائما من حدوث أى ارتفاع فى قيمة الـ P المطلوبة أو حدوث أى انخفاض فى قيمة الـ Q المتاحة فى الشبكة.

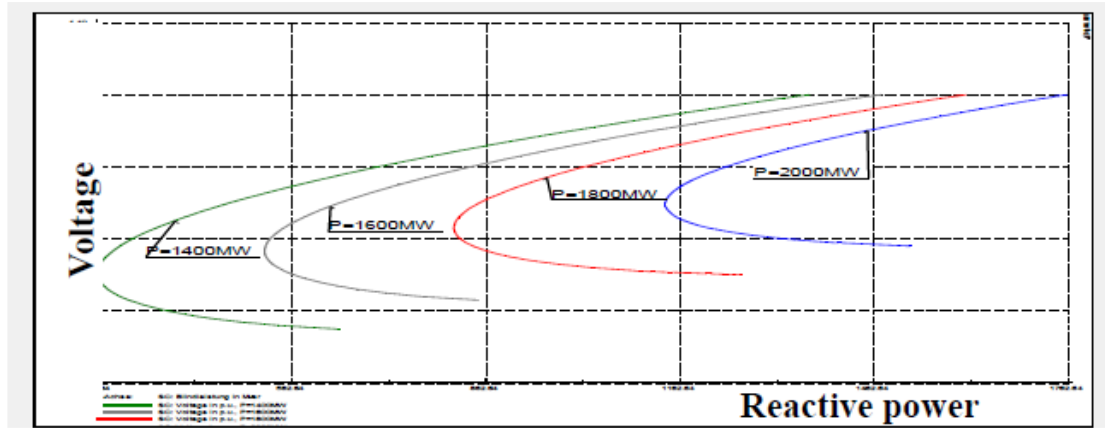


Figure 28-15 Q-V curves under different loads

والشكل 16-29 يلخص دور الـ Q التي نتحكم فيها بواسطة المكثفات C أو الملفات L من أجل التحكم في تثبيت قيمة الجهد V .

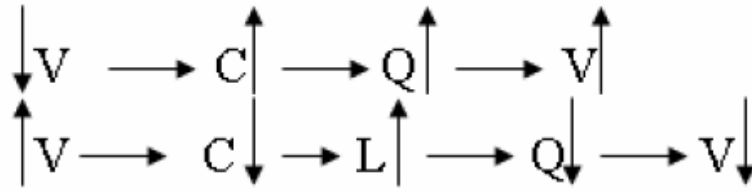


Figure 28-16

والمعادلة السابقة لها صورة مبسطة كالتالي :

$$V_r = \frac{V_s + \sqrt{V_s^2 - 4X_1 Q_r}}{2}$$

$$Q_r = Q_s - Q_L \text{ حيث}$$

ومنها يمكن استنباط عدة مفاهيم:

1- إذا كانت $Q_L = Q_s$ عندها تكون $Q_r = 0$ وتصبح $V_s = V_r$

2- إذا كانت $Q_L > Q_s$ عندها تكون $Q_r = +$ وتصبح $V_s > V_r$

3- إذا كانت $Q_L < Q_s$ عندها تكون $Q_r = -$ وتصبح $V_s < V_r$

- الحالة الأولى تمثل الوضع النموذجي
 - الحالة الثانية تمثل حالة أن المطلوب أكثر من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء النهار ويترتب عليه حدوث Voltage Dip
 - الحالة الثالثة تمثل حالة أن المطلوب أقل من المتاح وهذا يمثل الواقع أثناء الليل ويترتب عليه حدوث Ferranti Effect أى ارتفاع الجهد عند الحمل ويصبح أعلى من الجهد عند المصدر.
- ومن ثم يتضح تأثير قيمة الـ Q على ثبات قيمة والجهد وتغيرها فى الشبكات

28.13 العوامل المؤثرة على سرعة انهيار الجهد (عدم اتزانه)

هناك عدة أسباب تؤدي لحدوث هذه الظاهرة أهمها بالطبع زيادة الأحمال كما سبق شرحه. ومن الأسباب الأخرى:

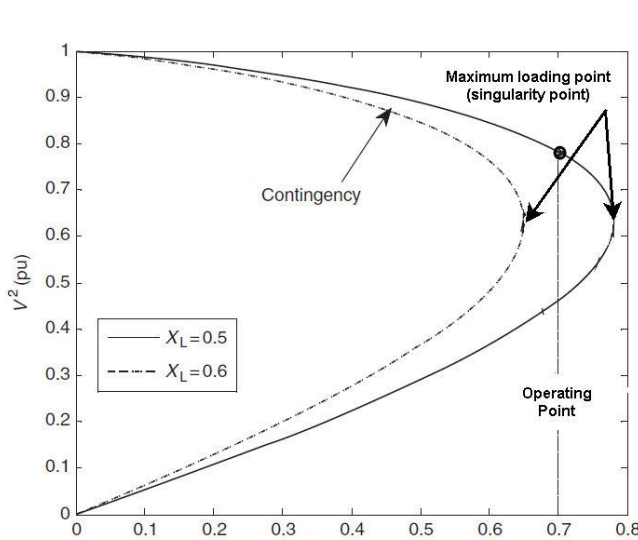


Figure 28-17

1- تغير قيمة X_{line} المكافئة

الواصلة بين الـ Source وبين

الـ Load وذلك قد يحدث

نتيجة فتح مفاجئ مثلاً لأحد

الخطوط بينهما فتزيد القيمة

المكافئة للـ X ومن ثم فإن

مساحة منحنى P-V سنقل

(الخط المنقط فى الشكل 29-

17) وهذا يعنى كما هو

واضح فى الشكل أن الـ

Stability Limit قد صار

أصغر واحتمالية اقتراب نقطة التشغيل من حد الاستقرار تزداد (لاحظ أن القدرة تتناسب مع مربع الجهد فى الشكل السابق).

2- ومن الظواهر التى قد تؤدي لانهيار الجهد تزامن حدوث Starting لعدد كبير من المحركات الحثية فى

نفس الوقت ، وهذا يعنى سحب تيار بدء عادى جدا ويتسبب ذلك فى انخفاض جهد الشبكة بسبب الـ

Voltage drop . وهذه المحركات تصنف ضمن معدات Constant Power Devices بمعنى أن

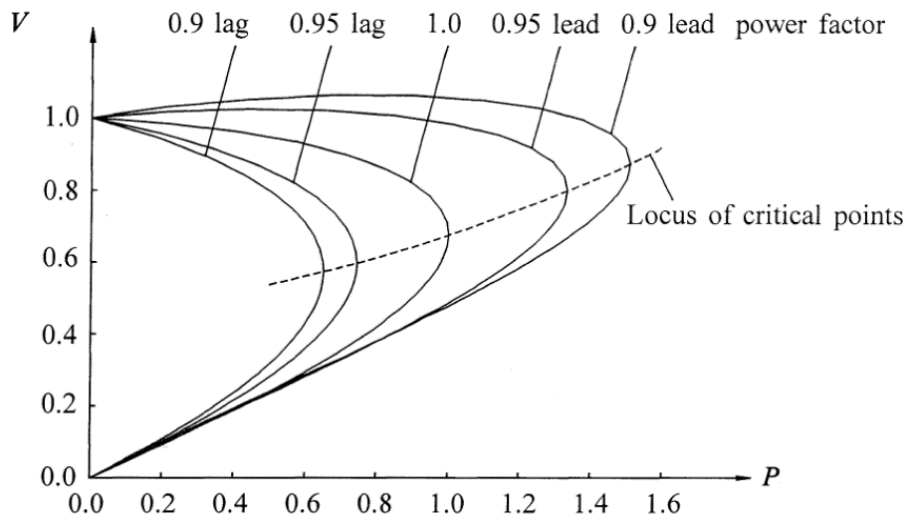
انخفاض الجهد عليها يصاحب بارتفاع التيار ($P = V \cdot I$) وهذا يعنى تفاقم المشكلة بسبب تزايد قيمة

التيار المسحوب وربما وصلنا لحد الانهيار.

3- ومن الظواهر التي تساعد في تسارع انهيار الجهد انخفاض قيمة معامل القدرة للأحمال المركبة. و بالمنحنيات الموجودة في الشكل 18-29 تبين مدى تأثير الـ Stability Margin بتغير قيمة الـ PF لارتباط ذلك بقيمة القدرة غير الفعالة المسحوبة للأحمال. وهذا يحتاج لشيء من الشرح كما في الجزء التالي.

28.13.1 ملحوظات على استقرار الجهد

2- منحنى الـ Nose Curve يمكن إعادة رسمه مع قيم مختلفة لمعامل القدرة كما في الشكل 18-29 حيث نلاحظ أن الوضع يزداد سوءا كلما انخفض معامل القدرة فيصبح مدى الاستقرار Stability Limit أصغر بينما يتحسن مع Leading PF وهذا له علاقة بالجزئية الخاصة بعلاقة الجهد مع القدرة غير الفعالة كما سنرى لاحقا حيث تتركب المكثفات على التوازي لرفع قيم الجهد.



تأثير معامل القدرة 18-28 Figure

- 3- أحد الأسباب الرئيسية لهذه الظاهرة هو ارتفاع الأحمال حتى تجاوزت قيمة أقصى قدرة يمكن نقلها على الخط ، وهو ما يؤدي إلى انتقالنا للعمل على الجزء السفلي من منحنى نقل القدرة.
- 4- ومن الأسباب الرئيسية أيضا أن أى انخفاض في الجهد سيؤدي إلى زيادة سحب القدرة غير الفعالة وهو ما يؤدي إلى مزيد من الانخفاض في الجهد وربما نصل لحافة منحنى الـ Nose Curve سريعا وندخل إلى الجزء السفلي من المنحنى ومن ثم نتجه مباشرة إلى انهيار الجهد .

28.14 طرق تحسين استقرار الجهد فى الشبكات

28.14.1 أولا فى شبكات الجهد العالى :

1. تغيير التغذية الخاصة بالـ Exciter لوحدات التوليد الموجودة بالخدمة مما يؤدي إلى زيادة أو نقصان القدرة الغير فعالة المولدة.
2. فصل وتوصيل الـ Reactors على الشبكة جهد 500 ك.ف (توجد فى مصر سبع ممانعات سعة 165 MVAR/Unit وحدثان بالسد العالى – وحدثان بنجع حمادى – ثلاث وحدات فى سمالوط).
3. تشغيل المكثفات المتزامنة (كما فى محطة محولات القاهرة 500 ك.ف حيث توجد 3 وحدات سعة 65 MVAR/Unit)
4. ضبط مغيرات الجهد فى محطات محولات 220 / 500 – 66/220 ك.ف
5. يستعمل مغير الجهد Tap Changer لرفع وخفض الجهد فى المحولات جهد 11/66 ك.ف
6. استخدام الـ Series Capacitive Compensation كما فى المخطط شكل 29-19.

لاحظ فى الـ P-Q Curve الخاص بالمولد أن إضافة أى Q جديدة ستساعد فى تغذية P إضافية جديدة عند نفس معامل القدرة.

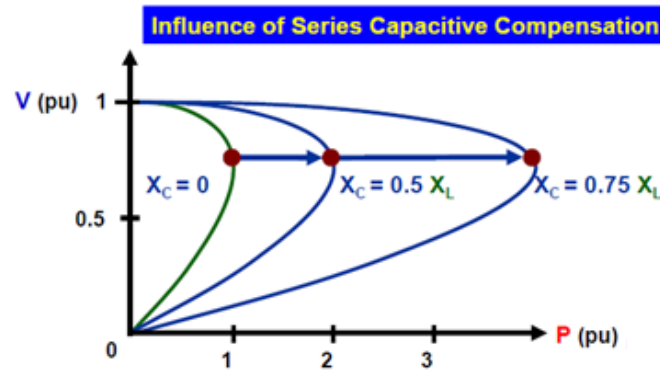
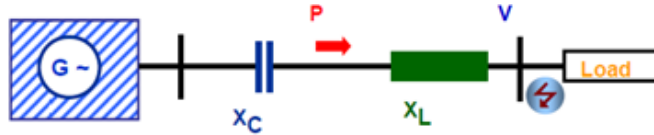


Figure 28-19 Series Compensation

7. استخدام أدوات تساعد في عمل Dynamic Voltage support عن طريق استخدام Dynamic Reactive Power Support ، والنتيجة واضحة في الشكل 20-29.

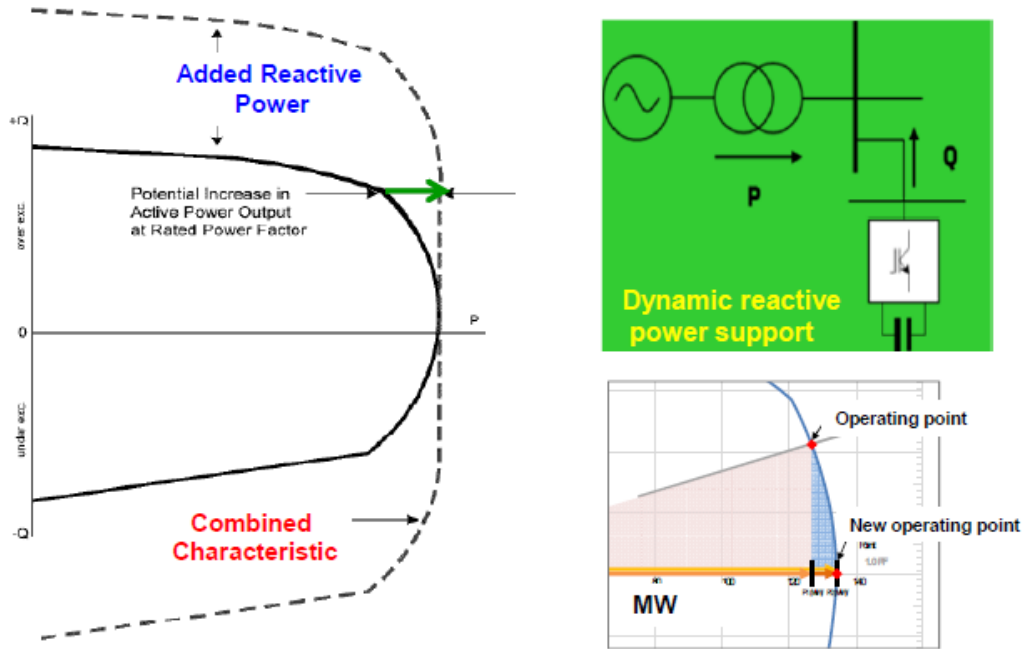


Figure 28-20

28.14.2 ثانيا : في الجهد المتوسط والمنخفض

ويتم هنا بعدة طرق منها :

1- استخدام المكثفات الثابتة :

تستخدم وحدة أو أكثر من المكثفات ، ويتم توصيلها بطريق مباشرة ومستديمة على قضبان التوزيع الرئيسية لتعطي مستوى ثابت من تعويض القدرة الغير فعالة.

2- استخدام بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية :

وتستخدم في معظم الأماكن حيث يكون معدل التغير في كل من القدرة الفعالة والغير فعالة كبيرا نسبيا نتيجة لتغير الأحمال ويكون استخدام المكثفات الثابتة أوفر اقتصاديا وأبسط فنيا من بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية .

غير أن تحديد استخدام أي من الطريقتين السابقتين وتقادى احتمال حدوث مشاكل عند توصيل مكثفات على الشبكة مع عدم وجود أحمال يتوقف على كل من قدرة محول التوزيع وقدرة المكثفات طبقا للقاعدة الآتية :

$$\frac{Q_c}{S_n} \geq 15\% : \text{يمكن استخدام المكثفات الثابتة}$$

$\frac{Q_c}{S_n} < 15\%$: تستخدم بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية ، حيث:

Q_c : قدرة المكثفات (kVAR)

S_n : قدرة محول التوزيع (kVA)

مكونات بطاريات المكثفات الأوتوماتيكية :

تقسم القدرة الكلية لبطارية المكثفات على مجموعة من الخطوات (عادة 6 أو 12 خطوة) بحيث يتم إدخال العدد المناسب من الخطوات لتغطية احتياج الأحمال من القدرة الغير الفعالة بدون زيادة أو نقصان وتتكون كل خطوة من المكونات التالية:

- وحدة مكثفات ثلاثية الطور موصله بطريقة (دلتا)
- "كونتاكتور" من نوع خاص لتعشيق وفصل المكثفات
- مصهرات ذات سعة قطع عالية (HRC) أو قواطع تيار لحماية وحدة المكثفات .
- منظم أوتوماتيكي (Regulator) لمعامل القدرة . يقوم بالتحكم في خطوات المكثفات بإدخال العدد المناسب منها طبقا لتغير الأحمال للوصول إلى معامل القدرة المطلوب بصفه دائمة .
- محول تيار (CT) يتم وضعه عند خرج المحول التوزيع مباشرة لقياس قيمة التيار المسحوب وتغذية المنظم الأوتوماتيكي بإشارة تيار تتناسب مع تيار الحمل.

3- استخدام وحدات التوليد الموزعة DG

وحيثما اضيفت طريقة ثالثة لتحسين اتزان الجهد بالشبكة وذلك بإضافة ما يسمى بالـ Distributed Generation, وهي مولدات (غالبا تعمل على إحدى أنواع مصادر الطاقة الجديدة مثل الطاقة الشمسية أو الرياح) لكنها تدخل في مرحلة التوزيع وليس في مرحلة التوليد كما في نظم القوى الكهربائية التقليدية والتي تتكون عادة من ثلاثة مراحل هي التوليد ثم النقل ثم التوزيع. أما في هذا النظام الجديد DG فإن المولدات تدخل في المرحلة الأخيرة (مرحلة التوزيع) لتحقيق عددا من المكاسب من أهمها أن تكون بالقرب من الأحمال فنقل القدرة المفقودة في الخطوط.

وأیضا لتساهم بكفاءة في تحسين اتزان الجهد بالشبكة كما سنرى من المنحنى شكل 29-21 الذى يمثل نفس منحنى الـ Nose Curve السابق لكن في وجود وعدم وجود الـ DG ومنه يتبين أن الـ Stability Margin زادت وبالتالي تحسن استقرار النظام .

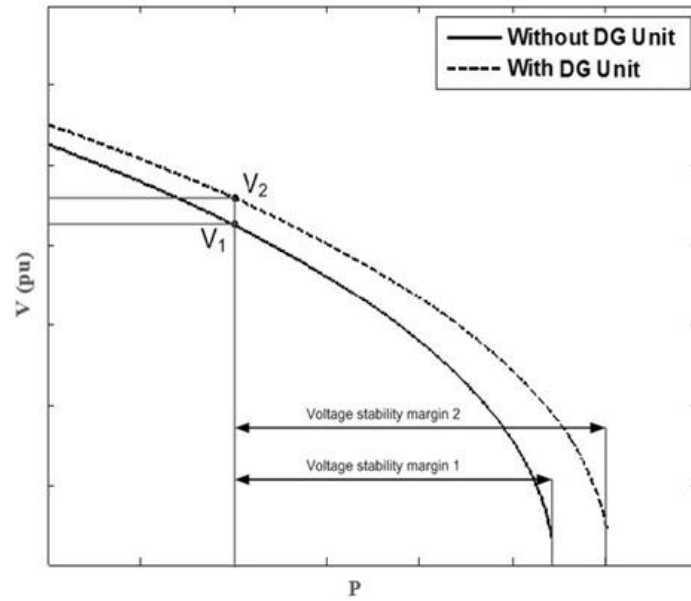


Figure 28-4

4- فصل الأحمال.

إذا لم يتيسر شيء من الطرق السابقة فلن يكون هناك حل للمحافظة على استقرار الجهد مع تزايد الأحمال واقترب نقطة التشغيل من حافة الـ Nose Curve سوى بفصل بعض الأحمال أو ما يعرف بالـ Load Shedding

5- إعادة توزيع الأحمال

هناك حل خامس لكنه حل على المدى البطيء وفكرته هو إعادة توزيع الأحمال داخل الشبكة لتقليل الضغط على الموزعات أو المحولات المحملة بشدة ، وهو ما يسمى بالـ Network Reconstruction أو Network Reconfiguration.

6- حلول أخرى

بالطبع هناك حلول أخرى مثل عمل خليط بين حلين أو ثلاثة من الحلول السابقة معا كأن نستخدم DG مع مكثفات مثلاً.

الخلاصة:

مما سبق يمكن أن نخلص إلى أن من أهم وسائل تجنب ظاهرة عدم اتزان الجهد ما يلي:

- 1- تحسين معامل القدرة للأحمال
- 2- تركيب مكثفات ثابتة ومتغيرة فى شبكات التوزيع بغرض الوصول لتحسين الـ Stability Limit وليس مجرد تحسين معامل القدرة وهذا يستلزم استخدام الـ Optimization Techniques لتحديد أفضل الأماكن وأدق القيم لهذه المكثفات
- 3- التوسع فى استخدام الـ VAR Compensators وتعنى معوضات القدرة غير الفعالة وهى أشكال عديدة ويمكن الرجوع لموضوع القدرة غير الفعالة بهذا الكتاب (الباب الثانى) للمزيد حول هذه النقطة خاصة أنها تساهم بشكل فعال جدا فى تحسين ثبات الجهد عند حدوث اهتزازات قوية Dynamic Stability.

29

التوافقيات في الشبكات الكهربائية

HARMONICS

معلوم أن المولدات تقوم في الأحوال العادية بإنتاج voltage signals على صورة sin wave بتردد ثابت. ويتم توصيل الأحمال لهذه المولدات عبر خطوط لنقل الطاقة تصل بين المولد والحمل ، ثم عند إغلاق الدائرة يمر تيار إلى الحمل تتوقف شدته على قيمة الجهد وقيمة مقاومة الحمل كما هو معلوم طبقا لقانون أوم. ويكون شكل موجة التيار في هذه الحالة تشبه تماما موجة الجهد وتختلف فقط في القيمة . وحتى لو كان الحمل مكونا من مقاومات وملفات فستظل شكل موجة التيار على شكل sin wave مثل الجهد مع وجود Phase angle بين موجتي الجهد والتيار .

وكل ما سبق صحيح بشرط أن يكون الحمل من النوع الـ Linear Load ، حيث تزيد قيمة التيار أو تقل مع تغير قيمة معاوقة الحمل بمعدلات ثابتة.

ثم بدأت مشاكل التوافقيات في الظهور مع انتشار non-linear loads ، ومع التوسع في استخدام أجهزة إلكترونيات القوى Power Electronics, PE في مغيرات السرعة للمحركات الكهربائية Speed Drives ، وكذلك استخدام الأجهزة الإلكترونية التي تحتاج إلى DC supply تحصل عليه من أجهزة switching power supplies ، واستخدام لمبات الفلورسنت ذات البالست الإلكترونية في الإضاءة . كل هذا أدى إلى واقع جديد مختلف عما سبق ، حيث تسببت هذه الأحمال و هذه الأجهزة في ظهور ترددات جديدة في موجة الجهد والتيار لم تكن موجودة في الأصل ، وهذه الترددات الجديدة هي التي نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonics .

29.1 ماهى الـ HARMONICS وكيف تنشأ ؟

فى العقود الأخيرة كما ذكرنا ظهرت أنواع جديدة من الأحمال لا تتغير قيمة التيار خلالها بوتيرة ثابتة ومحددة ، أو بمعنى آخر لا تتبع قانون أوم ، وبأسلوب آخر نقول أن هذه الأحمال الجديدة إذا وضعت عليها جهد على شكل \sin wave فليس بالضرورة أن يمر خلالها تيار له نفس الشكل ومن هنا سميت هذه الأحمال بأحمال Non-linear أو أحمال غير خطية . فإذا علمنا أن أكثر من 50% من الأحمال المنزلية وبنسبة أكبر فى الأحمال الصناعية الآن تصنف على أنها nonlinear loads فهذا يعطى مؤشرا لخطورة هذا الموضوع.

على سبيل المثال ظهرت دوائر توحيد التيار المتردد rectifier circuits التى تدخل عليها pure sin ويخرج منها التيار إلى الحمل بأشكال مختلفة حسب نوع العنصر المستخدم فى الدائرة وهل هو مثلاً دايود واحد أم Bridge أو ثايرستور SCR. لاحظ مثلاً فى الشكل 1-30 الاختلاف الكبير بين شكل الجهد فى الـ Input وشكله فى الـ Output علماً بأن شكل التيار المار فى الحمل (المقاومة) سيأخذ نفس شكل Output Voltage لأن الحمل مقاومات كما هو معلوم من أساسيات الـ Phasor Diagrams .

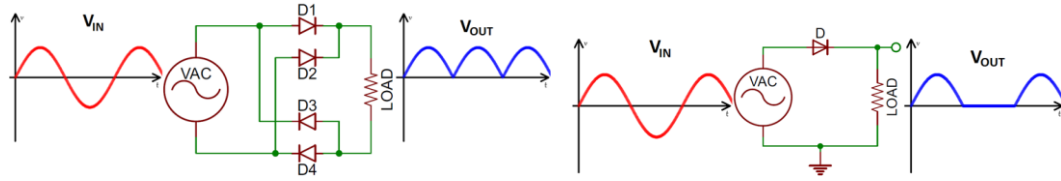


Figure 29-1 دوائر التوحيد بالديود

وقد يتشوه التيار بصورة أكبر إذا كانت الـ Rectifier circuits تعتمد على عنصر الـ SCR كما فى الشكل 2-30 الذى تظهر فيه إشارة جهد الدخول كـ Pure sin بينما التيار (الجزء المظلل) مختلف فى الشكل تماماً.

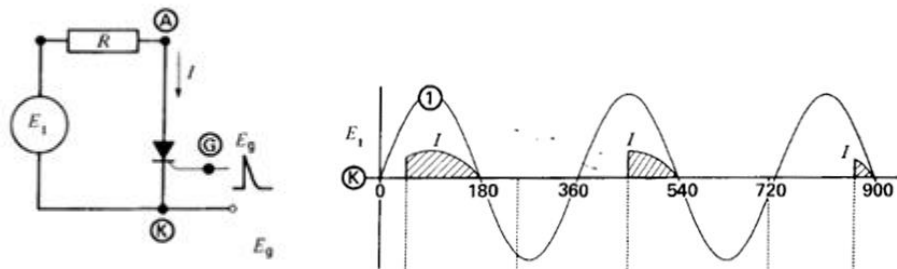


Figure 29-2 SCR Rectifier

هذه التوافقيات لا يقتصر تأثيرها فقط على مجرد تشويه شكل الموجة ، فلو كان الأمر فقط كذلك لما كان هناك مشكلة ، بل سيتعدى ذلك إلى سخونة المعدات واضطراب فى العمل وربما تدمير لبعض الأجهزة كما سنرى ذلك تفصيلا فى هذا الباب.

ونشير هنا إلى أن التوافقيات كانت موجودة حتى قبل ظهور هذه النوعية من الأحمال أو الأجهزة ، فقد كانت موجودة وإن كان ذلك بنسبة ضئيلة فى الجهود الناتجة من المولدات ، وكانت أيضا موجودة بنسب بسيطة بسبب محولات القوى فى الشبكة ، لكن الظهور الأقوى للتوافقيات كان بعد انتشار الأحمال غير الخطية وأجهزة الـ PE.

29.1.1 طبيعة التوافقيات



Figure 29-3

تبين من خلال استخدام أجهزة تحليل الموجات Spectrum Analyzer المعتمدة على نظرية Fourier Transform (شكل 30-3) أن موجة التيار لم تعد تشتمل على تردد الـ 50Hz فقط كما كان فى حالة الأحمال الخطية ، بل أصبحت تتكون من عدد من الترددات من مضاعفات الـ 50Hz، وهذه الترددات الجديدة - الغير موجودة أصلا فى موجة مصدر التغذية (جهد الدخول) - هى التى نسميها بالتوافقيات أو الـ Harmonics .

ويتم تقسيم التوافقيات إلى توافقيات ذات رتبة فردية (H_3 ، H_5 ، H_7) وتوافقيات ذات الرتبة الزوجية (H_2 ، H_4 ، H_6). والتوافقيات الفردية هى الأكثر شيوعا فى الشبكات الكهربائية ، ويكون تردد التوافقية هو حاصل ضرب رتبته فى 50 بمعنى أن تردد التوافقية الخامسة مثلا يساوى 5 ضرب 50 أى يساوى 250Hz .

والسبب فى عدم انتشار التوافقيات الزوجية الـ Even harmonics هو أن معظم الأحمال الإلكترونية لها half symmetrical wave ، مثل منحنى الـ Sin ، والتى يكون فيها الجزء الموجب والجزء السالب متماثلين تماما ، وفى هذه الحالة تسحب فقط ترددات من الفئة الفردية ، بينما الترددات من الفئة الزوجية تحتاج لوجود أحمال تسحب Full symmetrical waveforms وهى غير شائعة اللهم إلا فى حالات Arc Furnaces.

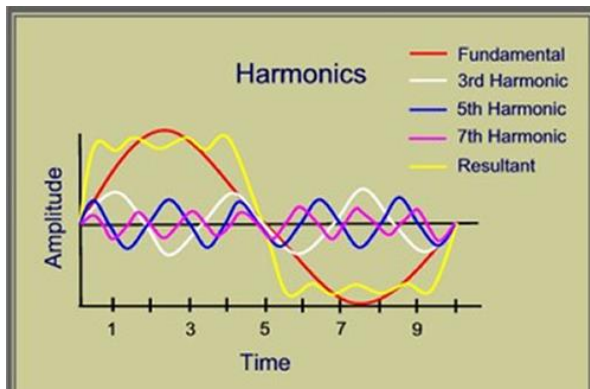


Figure 29-4 التوافقيات

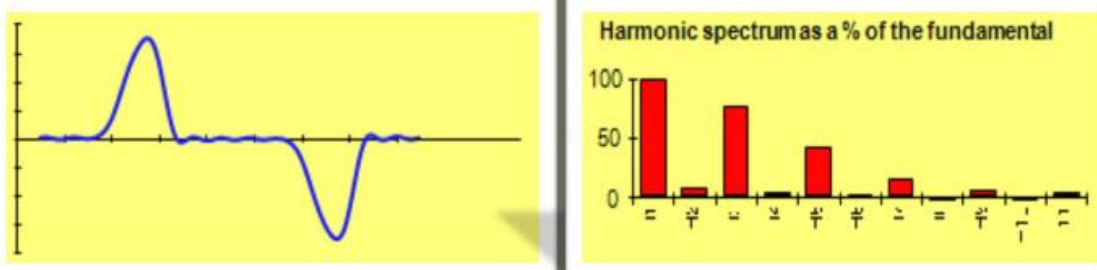
والشكل 30-4 يظهر نموذجا لبعض التوافقيات مقارنة بالتردد الأصلي الذى يسمى Fundamental حيث تظهر

الـ 150 Hz (Third Harmonic)

250 Hz (Fifth Harmonic)

350 Hz (seventh Harmonic)

كما تظهر الموجة المشوهة المحصلة Resultant الناتجة عن جمع كل هذه التوافقيات معا. وبعض الأجهزة تعطي نتائج التحليل على شكل نسب مئوية لقيمة الـ Spectrum المختلفة كما في الشكل 30-5.



تحليل الموجة Figure 29-5

مع ملاحظة أننا إذا قمنا بجمع الترددات المنفردة سواء رياضيا أو بالرسم فسنحصل مرة أخرى على الموجة المشوهة الأصلية كما في المعادلة والشكل 30-6.

$$I_{rms} = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h3}^2 + I_{h5}^2 + \dots + I_{hn}^2}$$

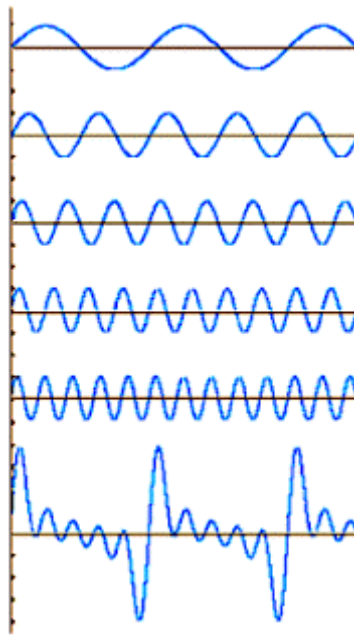


Figure 29-6

29.1.2 لماذا تختلف الـ Harmonics في إشارتي الجهد والتيار لنفس

الحمل؟

نستنتج مما سبق أن الـ Harmonics تتولد بسبب الأحمال الغير خطية أو الأحمال التي تستخدم أجهزة PE ، فهذه الأحمال تسحب تيارا من المصدر بتردد مختلف عن تردد الشبكة الأساسي (50Hz) ، وهذا التيار المتجه

من المصدر إلى الحمل الغير خطى يمر خلال معاوقات الخطوط الواصلة من الحمل للمصدر فينشأ عن مروره جهودا بترددات مختلفة عن الـ 50Hz ، وتجمع هذه الجهود الجديدة على الجهد الأصى عند كل نقطة فينشأ جهودا جديدة مشوهة لأنها نتاج جمع جهود ذات ترددات مختلفة كما فى المثال التالي فى الشكل 30-7.

فى البداية إذا تم تشغيل الحمل L3 فقط وهو Linear Load فسيمر تيار بالدائرة يشبه تماما إشارة الجهد ولن

تتأثر لا شكل ولا قيمة إشارة الجهد على الـ BBs المختلفة اللهم إلا بقدر الـ Voltage drop .

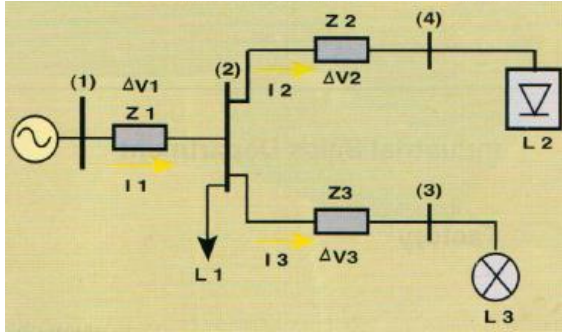


Figure 29-7

لكن بمجرد تشغيل الحمل L2 وهو من النوع الـ Non Linear فسيسحب تيارا مشوها ، وينشأ هبوط فى الجهد قدرة $\Delta V2 = I2 \times Z2$ وأيضا ينشأ هبوطا فى الجهد يساوى $\Delta V1 = I1 \times Z1$.

وبإضافة هذه القيم بإشارتها على قيم الجهود الأصلية سنكتشف أن الجهود على جميع الـ BBs أصبحت مشوهة وتزداد درجة التشوه كلما كانت قيم الـ $Z1, Z2$ Impedances عالية بينما يكون التشوه محدودا إذا كانت الـ Z صغيرة.

ومن هنا نقول :

1- يتوقف وجود أثر التوافقيات فى إشارة الجهد على قيم معاوقة النظام والخطوط .وبالتالى ففى بعض الحالات قد تجد التوافقيات عالية فى إشارة التيار (لأنها أصلا تظهر فى التيار) بينما لا وجود لها فى إشارة الجهد بسبب انخفاض معاوقات الخطوط.

2- أن الشبكات التى لها Short circuit Capacity مرتفعة والتى تسمى Strong Grid (وهذا يعنى X_{grid} منخفضة) سيكون تأثير الـ Harmonics عليها محدودا لصغر قيمة $(I \times Z)$ والعكس

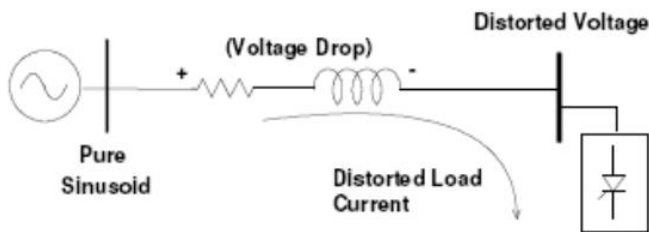


Figure 29-8

صحيح. والشكل 30-8 يوضح أكثر هذه النقطة ، فرغم تشوه الجهد عند الحمل يظل الجهد عند المصدر غير مشوه.

29.2 كيف نقيس حجم تأثير التوافقيات؟

يوجد معاملان مستخدمان لهذا الغرض :

- 1- الأول هو الـ Individual Harmonic Distortion ويقاس نسبة التشوه الناتج من وجود توافقية محددة واحدة مقارنة بالموجة الأصلية (سواء في الجهد أو التيار)
- 2- الثاني هو الـ Total Harmonic Distortion ويقاس نسبة التشوه الناتج من وجود كل التوافقيات مقارنة بالموجة الأصلية (سواء في الجهد أو التيار)

حساب الـ Individual Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما في المعادلة التالية (للتيار) .

$$IHD_n = I_n / I_1$$

حساب الـ Total Harmonic Distortion

يمكن حساب هذا المعامل كما في المعادلة التالية (للتيار) .

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots)}$$

$$THD = (I_H / I_1) \times 100\%$$

مثال:

احسب الـ THD في إشارة الجهد علما بأن القياسات أظهرت وجود توافقيات بالقيم التالية.

احسب أيضا الـ IHD .

$$\text{Fundamental} = V_1 = 114 \text{ V}$$

$$\text{3rd harmonic} = V_3 = 4 \text{ V}$$

$$\text{5th harmonic} = V_5 = 2 \text{ V}$$

$$\text{7th harmonic} = V_7 = 1.5 \text{ V}$$

$$\text{9th harmonic} = V_9 = 1 \text{ V}$$

الحل:

$$\text{RMS value of the harmonics} = V_H = \sqrt{(4^2 + 2^2 + 1.5^2 + 1^2)} = 4.82 \text{ V}$$

$$THD = (4.82/114) \times 100 \cong 4.23\%$$

ولحساب الـ Individual Harmonic Distortion

$$IHD_3 = 4/114 = 3.51\%$$

$$IHD_5 = 2/114 = 1.75\%$$

$$IHD_7 = 1.5/114 = 1.32\%$$

$$IHD_9 = 1/114 = 0.88\%$$

29.3 سمات هامة للتوافقيات.

الاختلاف بين التوافقيات ليس فقط اختلاف في قيمة التردد ، حيث التوافقية الثالثة مثلا ترددها 150 والخامسة ترددها 250 وهكذا ، فليس هذا هو الاختلاف الوحيد بين التوافقيات وبعضها البعض ، ولكن التوافقيات تختلف أيضا فيما بينها حسب الـ Phase Sequence . على سبيل المثال فالمعادلات الممثلة للتوافقية الثالثة هي

$$i_{a3} = I_{a3} \sin 3\omega t$$

$$i_{b3} = I_{b3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{b3} \sin (3\omega t - 360^\circ) = I_{b3} \sin 3\omega t$$

$$i_{c3} = I_{c3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{c3} \sin (3\omega t - 720^\circ) = I_{c3} \sin 3\omega t$$

وهنا تظهر المفاجأة الغريبة وهي أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الثالثة جميعها في نفس الاتجاه ولا يوجد بينهم أى Phase Sequence ولذا سميت التيارات التي تحمل هذه التوافقية بالـ Zero Sequence Currents.

أما المفاجأة الثانية فتظهر حين نكتب معادلات التوافقية الخامسة في الـ three phases على النحو التالي:

$$i_{a5} = I_{a5} \sin 5\omega t$$

$$i_{b5} = I_{b5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) = I_{b5} \sin (5\omega t - 600^\circ) = I_{b5} \sin (5\omega t - 240^\circ)$$

$$i_{c5} = I_{c5} \sin 5(\omega t - 240^\circ) = I_{c5} \sin (5\omega t - 1200^\circ) = I_{c5} \sin (5\omega t - 120^\circ)$$

وهنا تظهر المفاجأة الثانية وهي أن الـ three phases الممثلة للتوافقية الخامسة جميعها تدور فى نفس اتجاه عقارب الساعة أى أن التيارات التى تحمل هذه التوافقية تتميز بأنها من النوع المعروف بالـ Negative Sequence Currents.

فإذا نظرنا إلى معادلات التوافقية السابعة سنكتشف أنها من النوع المعروف بالـ Positive Sequence Currents كما هو واضح من المعادلات التالية

$$i_{a7} = I_{a7} \sin 7\omega t$$

$$i_{b7} = I_{b7} \sin 7(\omega t - 120^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 840^\circ) = I_{b7} \sin(7\omega t - 120^\circ)$$

$$i_{c7} = I_{c7} \sin 7(\omega t - 240^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 1680^\circ) = I_{c7} \sin(7\omega t - 240^\circ)$$

والشكل 9-30 يلخص ما سبق

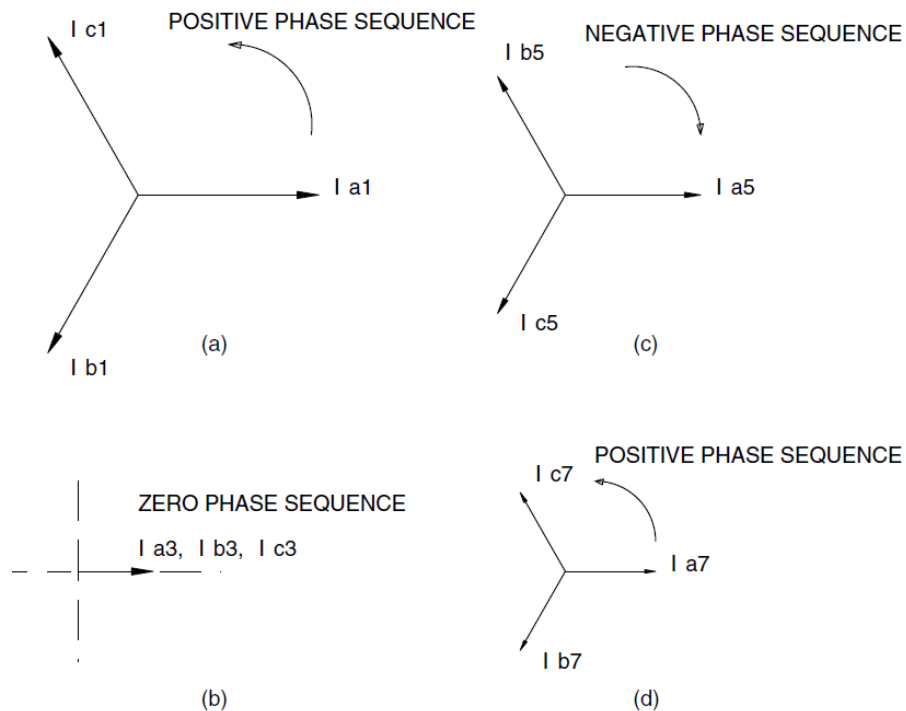


Figure 29-9

كما أن الجدول 5-30 يجمع نتائج بقية التوافقيات المعروفة والـ Phase Sequence الخاص بكل واحدة.

Table 29-1

Harmonic Order vs. Phase Sequence

Harmonic Order	Sequence
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Positive
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negative
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Zero

الخلاصة حتى الآن أن التوافقيات لها ترددات مختلفة ولها أيضا Phase Sequences مختلفة . والنقطة الثانية هامة جدا حين ندرس موضوع الـ Harmonic Cancellation حيث يمكن إجراء بعض التعديلات على قيم الزوايا من أجل أن تلغى مركبة مركبة أخرى كما سنرى.

29.4 مصادر توليد الـ HARMONICS :

تعتبر الأجهزة التالية هي أهم مصادر توليد التوافقيات فى الشبكات:

1. أجهزة الـ PE ومصابيح الـ LED

2. مصابيح الفلورسنت

3. المعدات ذات القوس الكهربى

4. محولات القوى

29.4.1 أجهزة التى تستخدم معدات الـ Power Electronics :

مثل موحدات التيار Rectifiers وكذلك الـ Inverters ومغيرات السرعة Drives . هذه الأجهزة تنتج كما كبيرا من التوافقيات بسبب تغيير شكل الموجة الخارجة عن الموجة الداخلة . وبالرغم من أن تأثير كل جهاز إلكترونى فى زيادة توافقيات الشبكة يعتبر صغيرا ، إلا أن كثرة عدد الأجهزة الإلكترونية تجعلها مصدرا مؤثرا للتوافقيات فى الشبكة .

ومن أشهر وأهم هذه الأجهزة أجهزة الـ 6-Pulse Converter ، وأجهزة الـ 12-Pulse Converters لكثرة انتشارها فى أجهزة الـ UPS. حيث هذه الأجهزة يمكنها تحويل الـ DC إلى AC والعكس كما فى الصورة شكل 10-30 التى تقارن بين الـ AC الناتجة من الـ 6-pulse Inverter وبين الـ AC الناتجة من الـ 12-pulse Inverter . لاحظ أيضا أنه كلما زادت عدد النبضات كلما كانت الموجة الناتجة أقرب للموجة الجيبية المرجوة وهذا يعنى أنها أقل فى التوافقيات.

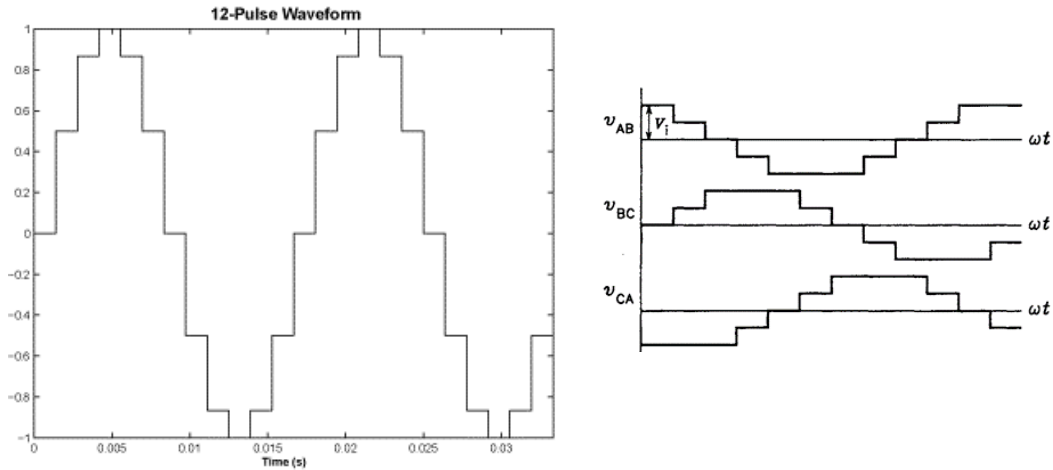


Figure 29-10

وهناك قاعدة تقول أن الـ Converter ذو p -pulse يولد توافقيات من الرتبة $pk \pm 1$. حيث p عدد النبضات pulse ، و k التسلسل (1، 2، 3،)

وعلى هذا ، فهذه الأجهزة تسبب تشويه فى موجتى الجهد والتيار وأغلب التوافقيات الناتجة هو من الرتب الفردية طبقاً للقاعدة السابقة . على سبيل المثال أجهزة الـ 6-Pulse ستولد توافقيات بأرقام تساوى $6k \pm 1$ أى يتولد التوافقيات الـ 5 و 7 و 11 و 13 (لاحظ غياب مضاعفات التوافقية الثالثة).

أما النوع الثانى 12-Pulse فينتج توافقيات من رتب $12k \pm 1$ أى توافقيات رقم 11 و 13 و 23 و 25 وهكذا . وبالمطابق مع ارتفاع رتبة التوافقية ستقل قيمتها بحيث يمكن إهمال التوافقيات الأعلى مثلاً من 49. وهذا سبب آخر لتمييز الـ 12-Pulse عن الـ 6-Pulse.

والأفضل من الاثنين استخدام الـ 18-pulse والذي ينتج التوافقيات (17 ، 19 ، 35 ، 37) ولكن مشكلته الوحيدة هو ارتفاع ثمنه لذا فهو نادر جداً في المكونات الكهربائية بالشبكة المصرية.

29.4.2 مصابيح الفلورسنت:

تولد المصابيح قوساً كهربياً ويتولد عنها توافقيات من الدرجة الثالثة . و الخبرة العملية دلت على أن قيمة تيار التوافقيات فى هذه المصابيح قد تصل إلى 30% من قيمة تيار التردد الأساسى.

وفى الجداول التالية دراسة عن حجم وجود التوافقيات فى الجهد والتيار فى بعض أنواع اللمبات المعروفة باسم Compact Florescent Lamp CFL . ووضح من هذه الجداول ارتفاع قيمة التشوه بدرجة هائلة فى إشارات التيار فى النموذجين الأول والثانى وهذا متوقع لاسيما بعد أن تنظر لشكل إشارة التيار فى الرسم الموجود فى يسار كل جدول.

Table 29-2

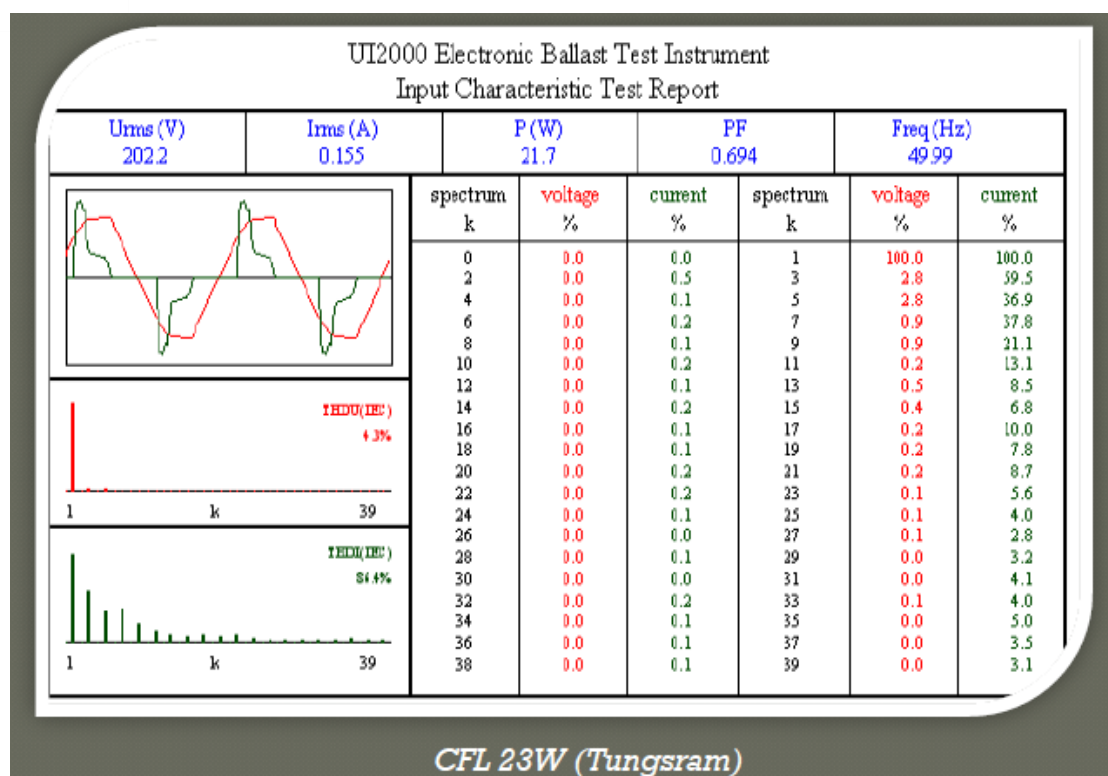


Table 29-3

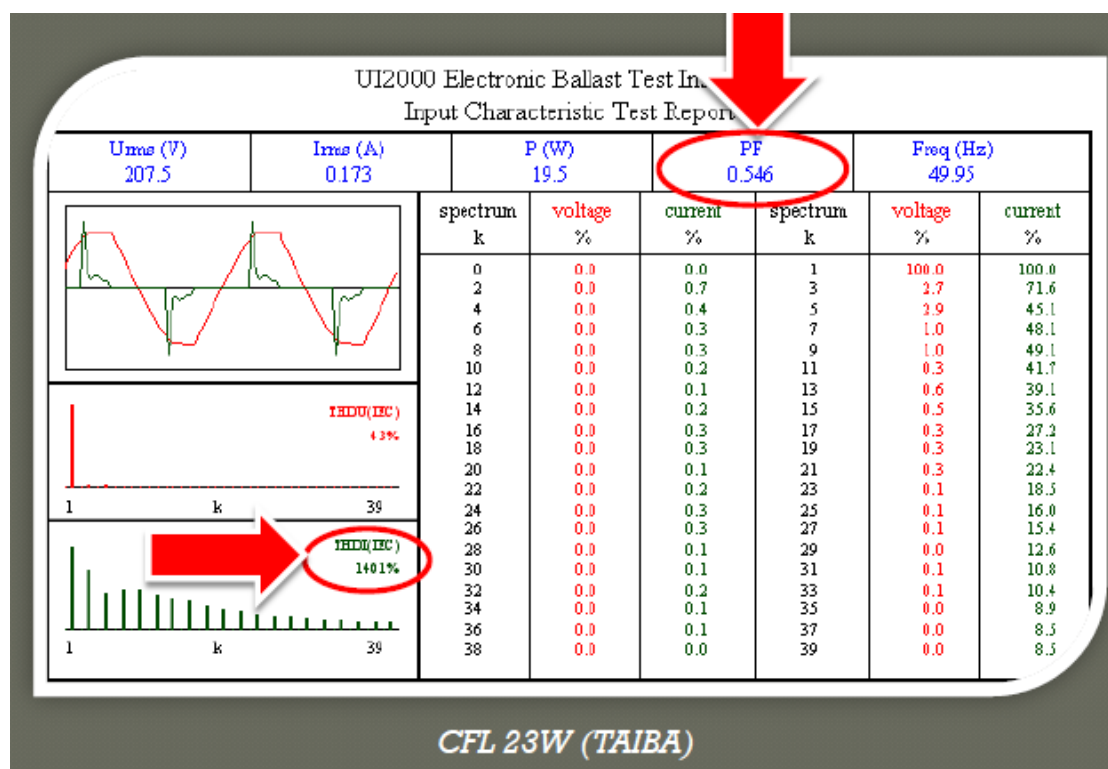
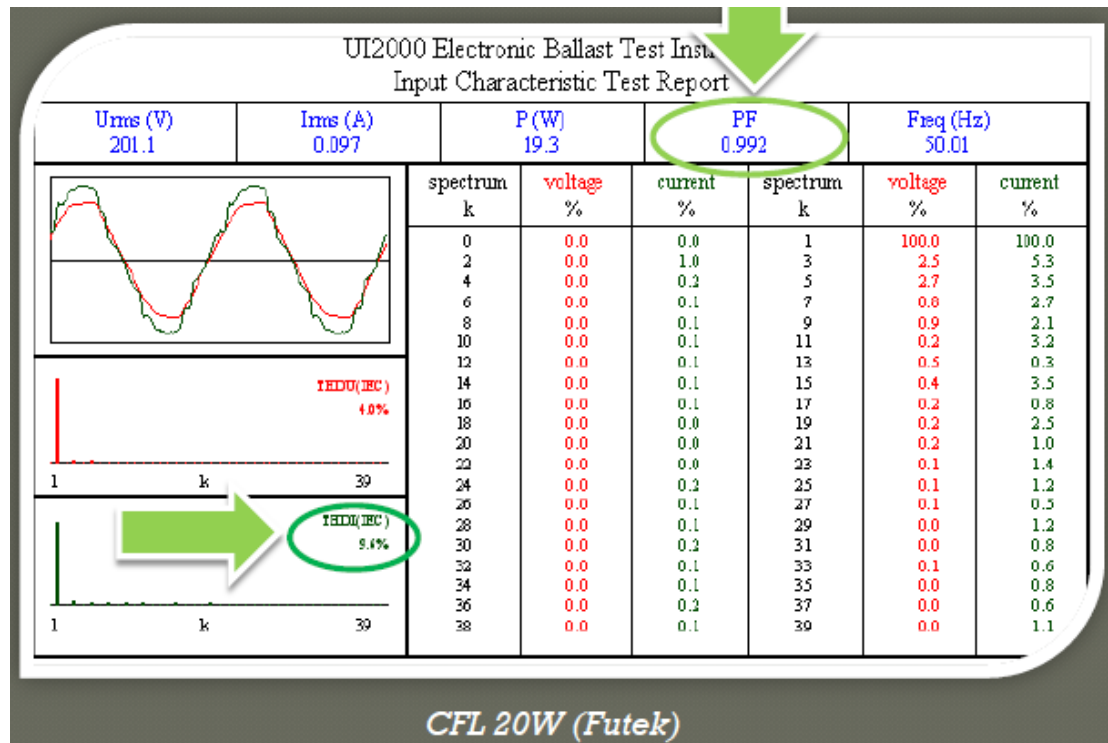


Table 29-4



ويمكن تقسيم هذا النوع من المصابيح إلى نوعين :

1. الأول ذو خصائص جيدة وله High Performance, HP ، كما في النموذج الثالث السابق ، وهذا النوع يتميز بأن THD له صغير جدا وفي الحدود المسموح بها طبقا ، وذلك حسب المواصفات الدولية رقم IEC 61000 -3-2 . وهذا النوع نادر جدا في السوق المصري ، وإن وجد فأسعاره مبالغ جدا فيها ، نتيجة تركيب نوع من الفلتر بهذا النوع من اللمبات لتتقية الموجة. ويصل THD فيه إلى 18%

2. الثاني ذو خصائص سيئة (Low Performance, LP) كما في النموذجين الأول والثاني السابقين ، وهذا النوع تصل فيه THD إلى 100% ، وهو منتشر جدا بالسوق المصري للأسف لرخص سعره.

والشكل 10-30 يوضح شكل موجة التيار لكل من النوعين منفردين ومجتمعين.

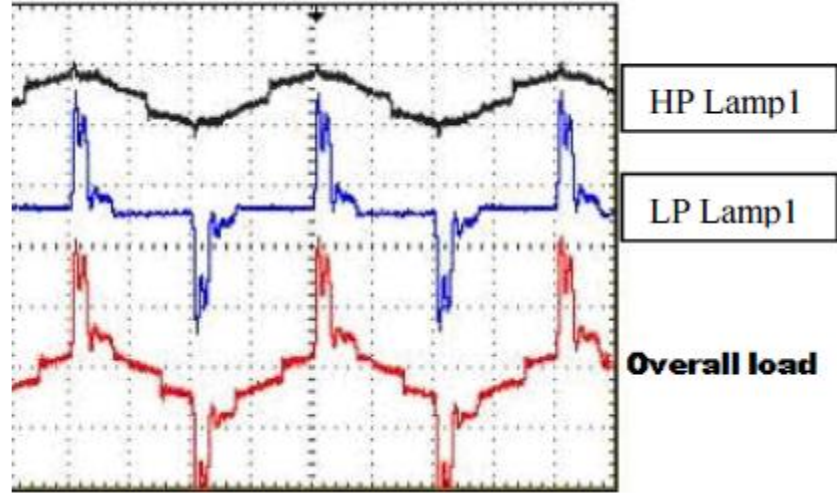
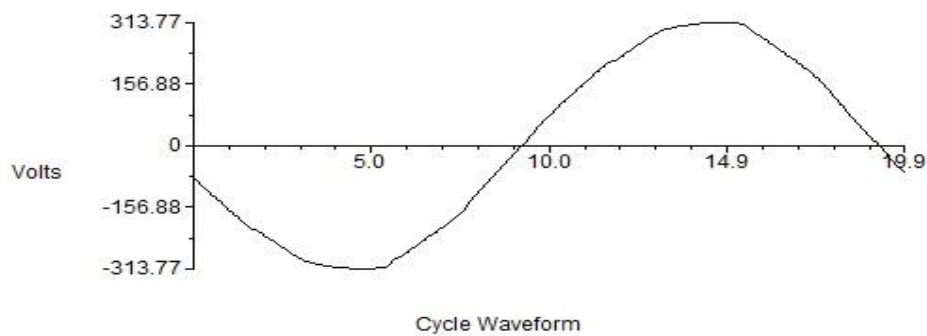


Figure 29-10 شكل موجات التيار في نوعين من أنواع اللمبات الفلورسنت

وفيما يلي دراسة تفصيلية على لمبة CFL قدرتها 25 وات من النوع low performance (أجراها أحد الطلاب الذين أشرف عليهم بالماجستير) . وقد وجد لها الخصائص التالية :

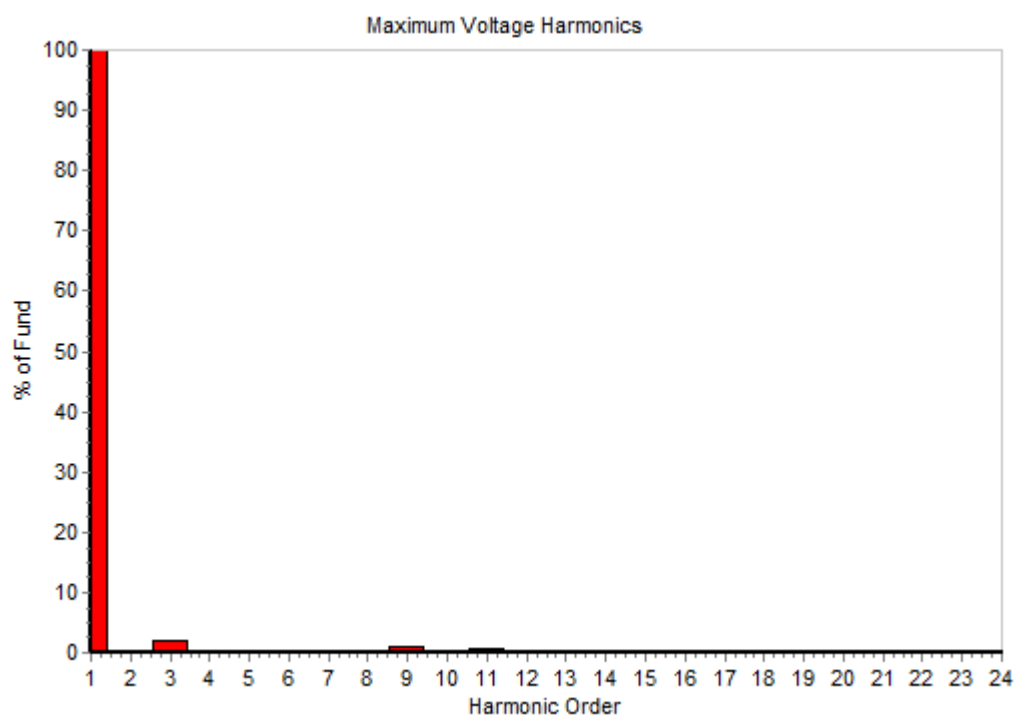
- القدره الفعلية (power) لللمبة 22 وات
- التيار (current) 0.158 امبير
- معامل القدرة الحقيقي (يأخذ في الحسبان التوافقيات) (total power factor) 0.66 (lead)
- معامل القدرة الظاهري (displacement power factor) 0.92 (lead)

وبالقياسات وجد أن التوافقيات في إشارة الجهد كانت في الحدود المسموح بها وشكل الموجه كما بالشكل التالي:

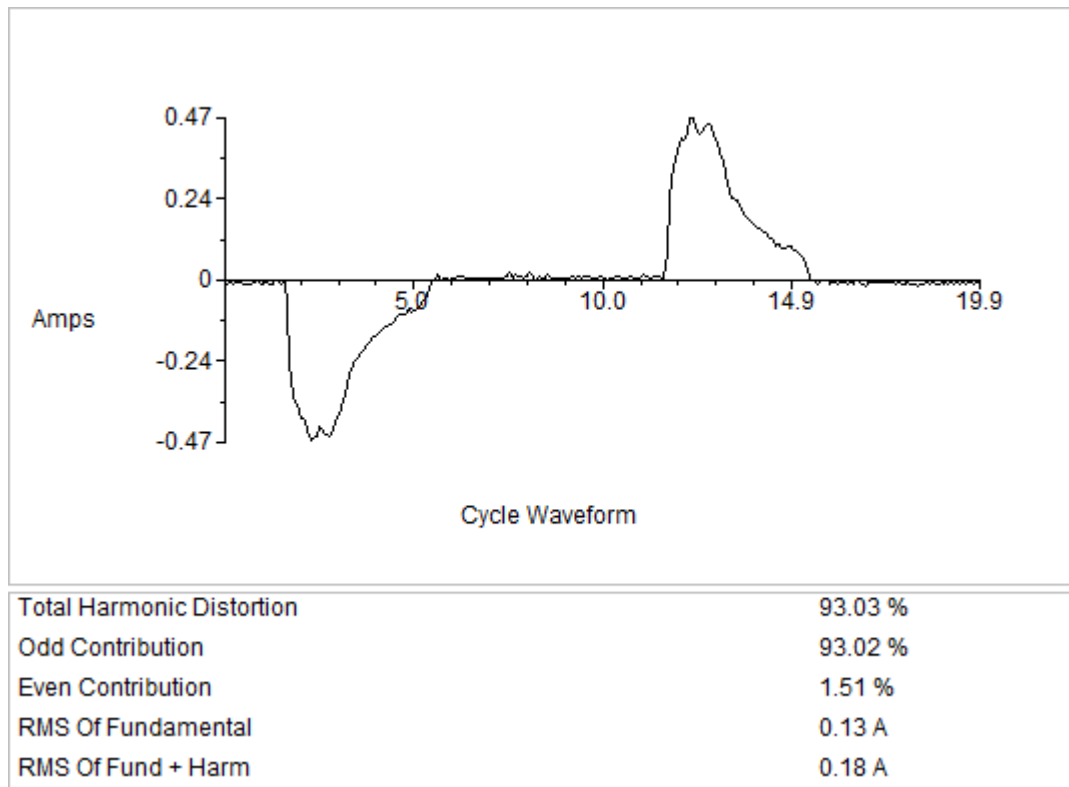


Total Harmonic Distortion	2.40 %
Odd Contribution	2.40 %
Even Contribution	0.08 %
RMS Of Fundamental	222.36 V
RMS Of Fund + Harm	222.42 V

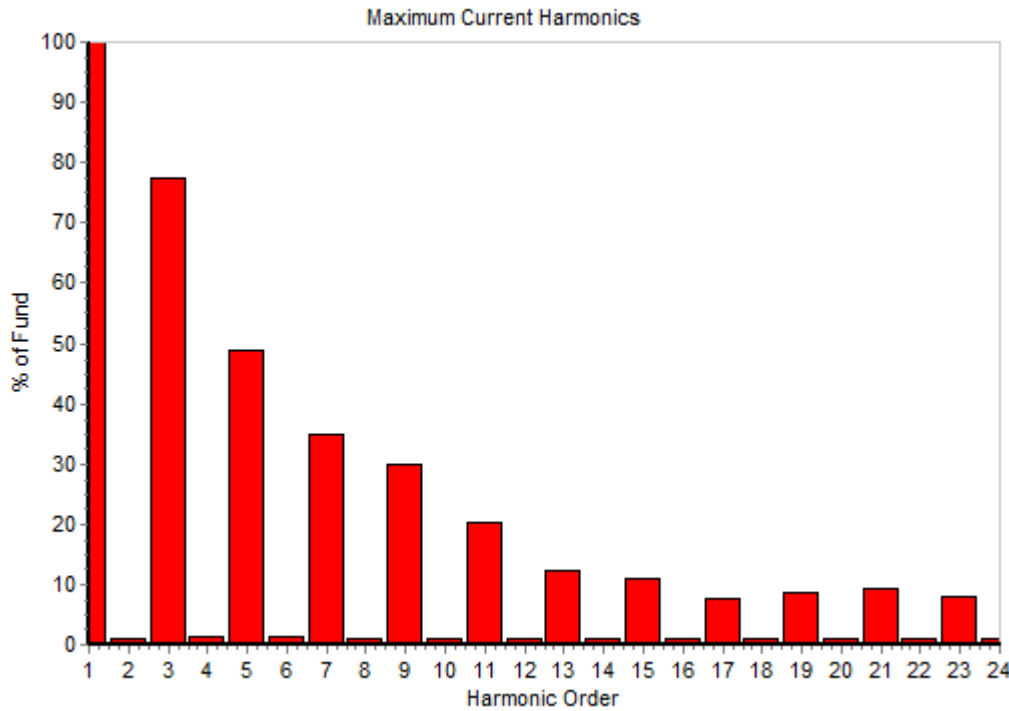
Harm Fund	% Of Fund	Volts	Angle	Harm	% Of Fund	Volts	Angle
0	100.00	222.4	0°	0	0.00	0.0	0°
3	2.03	4.5	93°	2	0.04	0.1	193°
5	0.33	0.7	342°	4	0.01	0.0	126°
7	0.32	0.7	53°	6	0.02	0.0	81°
9	0.95	2.1	182°	8	0.01	0.0	113°
11	0.52	1.2	340°	10	0.01	0.0	36°
13	0.18	0.4	299°	12	0.02	0.0	348°
15	0.25	0.6	233°	14	0.01	0.0	355°
17	0.15	0.3	80°	16	0.01	0.0	1°
19	0.12	0.3	201°	18	0.01	0.0	11°
21	0.20	0.4	312°	20	0.00	0.0	163°
23	0.04	0.1	214°	22	0.01	0.0	253°
25	0.10	0.2	235°	24	0.02	0.0	8°
27	0.15	0.3	13°	26	0.01	0.0	163°
29	0.02	0.0	200°	28	0.01	0.0	276°
31	0.09	0.2	233°	30	0.01	0.0	103°
33	0.05	0.1	104°	32	0.00	0.0	120°
35	0.03	0.1	216°	34	0.01	0.0	126°
37	0.10	0.2	325°	36	0.01	0.0	165°
39	0.01	0.0	131°	38	0.01	0.0	112°
41	0.04	0.1	196°	40	0.01	0.0	14°
43	0.01	0.0	310°	42	0.04	0.1	28°
45	0.02	0.0	159°	44	0.02	0.0	195°
47	0.05	0.1	295°	46	0.01	0.0	174°
49	0.02	0.0	220°	48	0.01	0.0	332°
51	0.03	0.1	146°	50	0.01	0.0	98°
53	0.03	0.1	26°	52	0.01	0.0	74°
55	0.01	0.0	156°	54	0.00	0.0	51°
57	0.01	0.0	263°	56	0.00	0.0	341°
59	0.01	0.0	54°	58	0.01	0.0	203°
61	0.03	0.1	154°	60	0.01	0.0	119°
63	0.01	0.0	61°	62	0.00	0.0	260°



أما التوافقيات في إشارة التيار فكانت كارثية كما هو متوقع و كما هو موضح بشكل الموجه التالي :



Harm	% Of Fund	Amps	Angle	Harm	% Of Fund	Amps	Angle
Fund	100.00	0.1	0°	0	0.00	0.0	0°
3	71.89	0.1	175°	2	0.07	0.0	68°
5	40.76	0.1	11°	4	0.09	0.0	116°
7	29.32	0.0	225°	6	0.21	0.0	90°
9	22.72	0.0	64°	8	0.23	0.0	99°
11	10.57	0.0	270°	10	0.27	0.0	148°
13	7.45	0.0	153°	12	0.29	0.0	117°
15	6.14	0.0	12°	14	0.05	0.0	327°
17	4.93	0.0	269°	16	0.30	0.0	166°
19	7.83	0.0	118°	18	0.05	0.0	193°
21	6.04	0.0	312°	20	0.18	0.0	59°
23	4.23	0.0	184°	22	0.38	0.0	195°
25	4.64	0.0	33°	24	0.25	0.0	23°
27	2.30	0.0	229°	26	0.24	0.0	308°
29	2.17	0.0	169°	28	0.35	0.0	31°
31	2.78	0.0	12°	30	0.29	0.0	237°
33	2.71	0.0	246°	32	0.34	0.0	53°
35	3.05	0.0	94°	34	0.12	0.0	23°
37	2.50	0.0	309°	36	0.42	0.0	326°
39	2.31	0.0	180°	38	0.12	0.0	148°
41	2.83	0.0	26°	40	0.15	0.0	299°
43	2.31	0.0	246°	42	0.45	0.0	259°
45	2.41	0.0	103°	44	0.33	0.0	290°
47	2.37	0.0	298°	46	0.19	0.0	327°
49	1.54	0.0	145°	48	0.15	0.0	107°
51	0.85	0.0	1°	50	0.26	0.0	343°



29.4.3 المعدات ذات القوس الكهربى "Arc furnaces" .

تعد الأفران ذات القوس الكهربى من أكبر المصادر المولدة للتوافقيات كما فى مصانع الحديد والصلب ، وتتشابه معها معدات اللحام بالقوس الكهربى. حيث تقوم فكرة عمل هذه الأجهزة على عمل تيار قصر "Short Circuit" قيمته مرتفعة جدا فتسحب تيارا عاليا يولد حرارة عالية جدا فى مقاومة المعدن تكفى لصهره، وعن طريق التشغيل المنقطع لهذه العملية نستطيع الوصول لدرجة حرارة معينة لصهر المعادن ، ولكن هذا التقطيع للتيار للأسف ينتج ما تسمى بالتوافقيات "Harmonics" مما يؤثر على جودة القدرة عند المصدر والذي بدوره يؤثر على الأحمال المجاورة لمثل هذه المنشآت الصناعية وداخل المنشآت أيضا .

المحولات:

المحولات ومثلها الأجهزة الكهرومغناطيسية لا تولد توافقيات طالما أنها تعمل فى المنطقة الخطية من منحنى مغنطة المواد المغناطيسية (يعرف أيضا بـ B-H curve) كما فى الشكل 30-11 ، ورغم أن شكل الفيض الناشئ يشبه شكل الجهد الذى أنشأه إلا أن التيار المسحوب يتأثر بالـ c/c non-linearity التى تميز علاقة الجهد والفيض فيصبح غير خطى كما فى الشكل وبالتالي يصبح المحول مصدرا للتوافقيات إذا دخل فى منطقة التشبع.

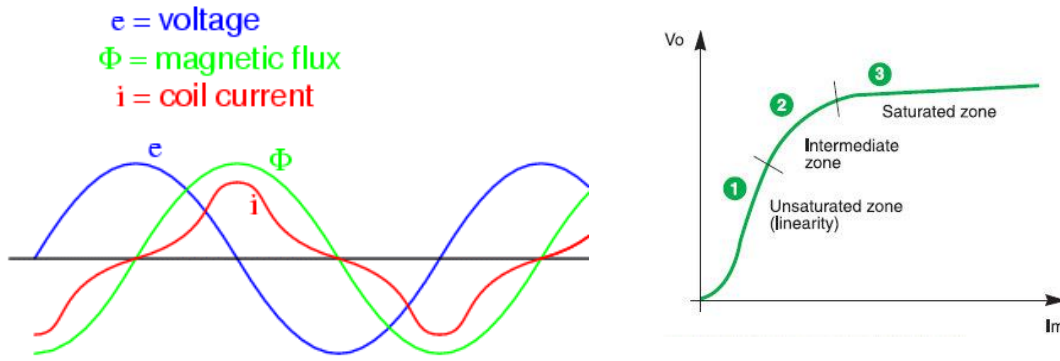


Figure 29-11 التوافقيات في المحول

ورغم أن كمية التوافقيات عادة لا تكون كبيرة ولكن بسبب كثرة عدد المحولات بالشبكة فإنها تصبح مؤثرة.

ولاعتبارات عملية تكون غالبا نقطة تشغيل المحولات قريبة من نهاية المنطقة الخطية وهذا يعنى أن أى زيادة طفيفة فى جهد الدخول ستسبب دخول المحول فى منطقة التشبع وتوليد توافقيات ، على سبيل المثال فى الصباح الباكر تكون الأحمال فى الشبكة منخفضة والجهد نسبيا مرتفعا وهذا يجعل المحول يدخل فى منطقة التشبع وهذا يفسر تغير مستوى التوافقيات خلال النهار.

والجدول 30-4 يلخص رتب التوافقيات فى بعض من الأجهزة الواسعة الانتشار.

Table 29-5

Device	Predominant Harmonics					
	3rd	5th	7th	9th	11th	13th
1Ph Computer Power Supplies						
3Ph Computer Power Supplies						
3Ph UPS						
Electronic Ballasts						
6 Pulse Drive						
12 Pulse Drive						

29.5 المشاكل الناتجة عن التوافقيات.

تسبب التوافقيات مشكلات عديدة للمعدات الكهربائية المختلفة وأجهزة التحكم مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة تشغيلها أو تعطيل عملها. وفيما يلي أهم المشكلات الناتجة عن التوافقيات فى أجهزة ومعدات الشبكة الكهربائية.

29.5.1 تأثير التوافقيات على المحولات:

تؤثر التوافقيات على المحولات تأثير مزدوجا حيث تسبب زيادة في المفاقيد النحاسية والمفاقيد الحديدية ويكون التأثير الإجمالي هو زيادة سخونة المحول.

يعتمد الفقد في المحول الناتج عن التوافقيات على التردد وتكون التوافقيات ذات القيمة العالية في التردد لها تأثير ملحوظ على الفقد Losses وتؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تدهور العزل مما يؤدي إلى تعطل المحول بالكامل.

تأثيرها على الـ Eddy current Losses

$$W_e = k_e B_{\max}^2 f^2$$

تأثيرها على الـ Hysteresis loss

$$W_h = k_h B_{\max}^{1.6} f V$$

وينبغي - إذا كان من المتوقع وجود توافقيات بنسب عالية - استعمال محولات خاصة يتم تصميمها على أساس هامش أمان أكبر يعرف بالـ K-Factor ، وبالطبع هذا يؤدي إلى زيادة تكلفة المحول ويكون البديل لذلك هو خفض قدرة تحميل المحول في وجود التوافقيات.

29.5.2 ما هو الـ K-Factor

ظهرت أهمية هذا المعامل مع تزايد نوعية الأحمال التي بها أجهزة إلكترونية والتي تستخدم Hi Speed-Electronic Switches ، وكذلك مع تزايد استخدام لمبات التفريغ الكهربى Discharge Lamp ، فكل هذه الأحمال تصنف على أنها أحمال غير خطية Non-Linear loads بمعنى آخر أن احتمال وجود الـ Harmonics المسببة لارتفاع درجة حرارة المحول يكون كبيرا.

ومن هنا ظهرت الحاجة لوجود نوعية من المحولات لها تصميم خاص للتعامل مع النسبة العالية لوجود الأحمال الغير خطية. على سبيل المثال فالـ K-4 Transformers تستخدم إذا كانت نسبة الأحمال الغير خطية تصل نسبتها إلى 50% ، وعادة تستخدم هذه النوعية من المحولات في تغذية المباني الإدارية التي تكثر بها هذه النوعية من الأحمال . ويمكن الرجوع للجدول 30-6 لمعرفة الـ K-Factor المناسب للمحول حسب نوعية الأحمال الموصلة عليه.

Table 29-6

Load	K-Factor
Electric discharge lighting	K-4
UPS with optional input filtering	K-4
Welders	K-4
Induction heating equipment	K-4
PLCs and solid state controls (other than variable speed drives)	K-4
Telecommunications equipment (e.g. PBX)	K-13
UPS without input filtering	K-13
Multiwire receptacle circuits in general care areas of health care facilities and classrooms of schools, etc.	K-13
Multiwire receptacle circuits supplying inspection or testing equipment on an assembly or production line	K-13
Mainframe computer loads	K-20
Solid state motor drives (variable speed drives)	K-20
Multiwire receptacle circuits in critical care areas and operating/recovery rooms of hospitals	K-20

29.5.3 كيف يتم حساب الـ K-Factor ؟

تتوقف قيمة هذا المعامل كما ذكرنا على حسب كمية التوافقيات الموجودة بالتيارات المارة بالأحمال المتصلة بهذا المحول. ولذا فالخطوة الأولى لحساب هذا المعامل هو تحديد قيمة كل توافقية بالتيار بما فيها الـ Fundamental ثم من هذه القيم نحسب قيمة التيار الكلي

$$I_T = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

ثم نحسب نسبة كل توافقية بالنسبة للتيار الكلي

$$I'_1 = \frac{I_1}{I_T} \text{ and } I'_3 = \frac{I_3}{I_T} \text{ etc}$$

وأخيرا نطبق في المعادلة التالية لحساب قيمة الـ k-Factor

$$K = I_1'^2 * f_1^2 + I_3'^2 * f_3^2 + I_5'^2 * f_5^2 + \dots$$

مثال

احسب قيمة الـ K-Factor المناسبة لمحول يغذى أحمالا غير خطية علما بأن قيم التيار كالتالي:

200A	of fundamental (60 Hz),
30A	of 3rd harmonic,
48A	of 5th harmonic
79A	of 7th harmonic.

الحل:

$$I_T = \sqrt{200^2 + 30^2 + 48^2 + 79^2} = 222.4A$$

$$I'_1 = \frac{200}{222.4} = 0.899 \text{ and } I'_3 = \frac{30}{222.4} = 0.135 \text{ and } I'_5 = \frac{48}{222.4} = 0.216 \text{ and } I'_7 = \frac{79}{222.4} = 0.355$$

$$K = 0.899^2 * 1^2 + 0.135^2 * 3^2 + 0.216^2 * 5^2 + 0.355^2 * 7^2 = 8.31$$

وهذا يعنى أننا نحتاج لمحول له تيار مقنن لا يقل عن 222 أمبير وله K-Factor يساوى 9.

29.5.4 تأثيرات متنوعة للتوافقيات

تأثير **التوافقيات** **على** **الآلات** **والمحركات** **الدوارة:**

تتأثر الآلات والمحركات الدوارة بالتوافقيات وتزداد سخونتها الناتجة من الفقد في الحديد والنحاس بسبب هذه التوافقيات ، وقد تؤثر التوافقيات على العزل ، وقد تؤدي أيضا إلى زيادة الضوضاء .

ويمكن بسهولة تفسير سخونة المحرك بسبب هذه التوافقيات من خلال تذكر أن التيار المتردد يميل للمرور على السطح الخارجي للموصل Skin effect ، لاسيما مع زيادة التردد ، فلو علمنا أن لدينا ترددات تصل للترتبة الأربعين في تيار المحركات بسبب أجهزة التحكم في البدء لهذه المحركات وغيرها من أجهزة الـ Variable Frequency Drives (VFDs) فإن هذه التوافقيات العالية ستجعل التيار في بارات الـ Rotor يسير في شريحة ضيقة جدا من مساحة مقطع الموصلات ، ومن ثم ترتفع قيمة المقاومة وبالتالي يسخن المحرك بشدة.

ظاهرة الزحف في المحركات Crawling

يمكن أن تؤدي التوافقيات في المحرك الحثي إلى ظاهرة الامتناع عن الحركة. وتفسير ذلك أن بعض الترددات الناشئة في التيار تكون من النوع الـ negative sequence ستنتج Reverse Torque أو ما يسمى بالـ Breaking Torque ، وقد تؤدي التوافقيات عالية الدرجة إلى تدهور أداء أجهزة التحكم في السرعة وأجهزة بدء الحركة الإلكترونية الخاصة بالمحركات .

ومعلوم أن أساس عمل هذه المحركات مبني على قاعدة أن مرور 3-phase currents سينتج Rotating Field في منطقة الـ Air gap ، ومن ثم فالتشوه بسبب التوافقيات سيجعل القاعدة السابقة مضطربة خلال البدء على الأقل لاسيما بسبب negative sequence torques.

فالموتور الحثي مثلاً يدور بسرعة تقريبا تساوي الـ synchronous speed, N_s طالما أن التردد الموجود هو 50 هرتز ، لكن التوافقية الخامسة مثلاً تدور بسرعة $5N_s$ في عكس اتجاه دوران المحرك وكذلك باقى التوافقيات من النوع الـ Negative Sequence Harmonics ، فهذه التوافقيات تحاول جر المحرك ليدور عكس اتجاه دورانه الأصلي ، وكلما كانت نسبة هذه التوافقيات عالية كلما كان ظهور هذه المشكلة أوضح.

تأثير التوافقيات على الكابلات:

يظهر تأثير التوافقيات على الكابلات في عدة مظاهر منها زيادة مقاومة الموصل لارتفاع درجة حرارته كما تزداد مقاومة الموصل نتيجة لميل التيار ذات التردد العالي للتواجد بالقرب من السطح الخارجي للموصل و هو ما يعرف باسم *Skin Effect* ، كما تتسبب التوافقيات في زيادة الهبوط في الجهد نتيجة ارتفاع المقاومة ، و ينتج عن هذا عدم وصول الجهد إلى المستهلك بالقيمة المطلوبة ، و كذلك تتسبب في ارتفاع الجهد عند نقطة التعادل.

نذكر أيضاً بأن ارتفاع حرارة الكابل بسبب التوافقيات ليس فقط بسبب *Skin Effect* كما سبق وإنما هناك مصدر آخر للحرارة وهو ارتفاع قيمة الـ Dielectric losses طبقاً للمعادلة:

$$P_d = 2\pi f C V^2 \tan \delta$$

وهذا يعنى سخونة إضافية للكابل .

التأثير على موصل التعادل "Neutral Cables".

ففي الحالة الطبيعية يكون مجموع التيارات المارة بموصل الـ Neutral يساوى صفراً (جمع اتجاهي وليس جبري) ، وذلك في الحالة المتزنة "Balanced" ، أما في حالة عدم الاتزان "Unbalanced" فيكون تيار خط التعادل لا يساوى صفراً.

ولكن نظراً لوجود التوافقيات "Harmonics" من الرتبة الثالثة ومضاعفاتها والتي تتميز بعدم وجود Phase Angle بين فازاتها الثلاثة فإنه بالتأكيد سيكون مجموع التيارات جبرياً ولن يساوى صفراً ، مما سيؤدي إلى رفع

درجة حرارة الكبل ويحدث له "Over heating" ، وبالتالي سنحتاج إلى معالجة هذه المشكلة عن طريق زيادة معدلات تحمل كابل التعادل لتعادي هذه التأثيرات وأيضا بعض الحلول الأخرى مثل زيادة مقطع موصل التعادل ، وهذا هو السبب في ظهور ما يسمى Full size neutral conductor ، حيث كان قديما مع الأحمال الخطية كنا نستخدم ما يسمى Reduced neutral size . بمعنى أنه سابقا مثلا كان يتم استخدام كابلات مساحة مقطوعها $240+120 \text{ مم}^2$ ، مثلا ، وكان مساحة مقطع كابل التعادل 120 مم^2 ، أما الآن فيستخدم $240 \times 4 \text{ مم}^2$ ، وهذا في المباني الإدارية التي تنتشر بها أجهزة الحاسب الآلي واللمبات الموفرة ولمبات اللد .

مع ملاحظة أن ارتفاع تيار خط التعادل يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع الجهد بين الـ Neutral والـ Earth عن القيمة الأساسية (طبقا للمواصفات القياسية العالمية IEEE1100-92) .

تأثير التوافقيات على مصابيح التفريغ الغازية:

من الممكن أن يحدث أعطال في choke coils بسبب سخونة الزائدة التي تسببها التوافقيات.

تأثير التوافقيات على معامل القدرة

معامل القدرة الذي نحسبه بالمعادلات التقليدية ($P.F = P/(V.I)$) يعتبر صحيحا فقط طالما أن تردد إشارتي الجهد والتيار هو 50Hz ، أما مع تواجد التوافقيات في الدائرة فإن معامل القدرة الحقيقي True PF يحسب من المعادلة التالية:

$$pf_{true} = \frac{P_{avg}}{V_{rms}I_{rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}}$$

ويمكن إهمال تأثير التشوه في إشارة الجهد لأنه دائما صغير القيمة كما ذكرنا سابقا ومن ثم تصبح المعادلة السابقة بعد التبسيط كما يلي :

$$pf_{true} \approx \frac{P_{avg1}}{V_{rms}I_{rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I / 100)^2}}$$

والشكل 30-13 يظهر كيفية تأثر قيمة معامل القدرة مع زيادة التشوه في التيار والذي نعبر عن هذا التشوه بقيمة الـ THD-i ، فمن الواضح أنه مع زيادة التوافقيات تنخفض قيمة معامل القدرة.

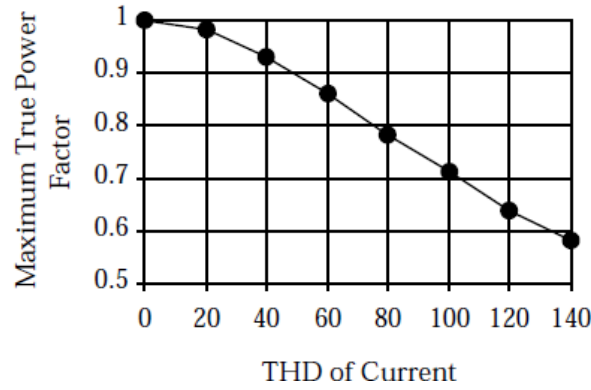


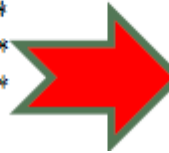
Figure 29-11

والجدول 30-7 يعطى قيم معامل القدرة لبعض الأجهزة المشهورة ونسبة التشوه فى إشارة التيار بهذه الأجهزة.

Table 29-7 True PF

Table 1: Power Factor and Current Distortion Measurements for Common Single-Phase Residential Loads

Load Type	<i>pf disp</i>	<i>THDI</i>	<i>pf dist</i>	<i>pf true</i>
Ceiling Fan	0.999	1.8	1.000	0.999
Refrigerator	0.875	13.4	0.991	0.867
Microwave Oven	0.998	18.2	0.984	0.982
Vacuum Cleaner	0.951	26.0	0.968	0.921
Fluorescent Ceiling Lamp	0.956 *	39.5	0.930	0.889
Television	0.988 *	121.0	0.637	0.629
Desktop Computer and Printer	0.999 *	140.0	0.581	0.580



والملاحظ هنا انخفاض المعامل الحقيقي بسبب التوافقيات ، ومعلوم أن أي انخفاض فى معامل القدرة يؤدي بالضرورة إلى ارتفاع التيار فى الشبكة مما يتسبب عنه فقد فى القدرة فى الكابلات الأرضية و خطوط النقل و كذلك فى المحولات الكهربائية ، وينتج عن ذلك ارتفاع فى درجة الحرارة ، مما قد يتسبب فى انهيار بعض مكونات الشبكة و كذلك يتسبب انخفاض معامل القدرة فى زيادة الهبوط فى الجهود .

تأثير التوافقيات على أجهزة القياس:

تتم معايرة عدادات استهلاك الطاقة على أساس أن التغذية الكهربائية تتم من موجة ذات شكل جيبي خالص وقد تعطى هذه العدادات قراءات خاطئة عند وجود التوافقيات لاسيما الأجهزة التى تعتمد على قياس Average.

والسبب في ذلك يمكن فهمه من الجزء السابق حيث وجد أن التوافقيات قد أثرت بشدة على قيمة معامل القدرة Power factor وهذا سبب آخر لظهور الأخطاء في أجهزة القياس. فمعامل القدرة الحقيقي True PF هو محصلة جزئين :

- الأول هو displacement power factor الناتج عن الفرق الطبيعي بين الجهد والتيار بسبب طبيعة الحمل
 - الثاني هو distortion power factor الناشئ بسبب التوافقيات.
- وغالبا ما يكون المعامل الناتج عن جمعهما true PF أقل من المعامل الأصلي بسبب التشوه كما في الجدول 7-30 السابق. والقوانين الحاكمة لهذه الكميات تظهر لاحقا.

تأثير التوافقيات على المكثفات

تأثير التوافقيات على المكثفات غالبا ما يكون مدمرا ، فمعلوم أن معاوقة المكثف $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ وهذا يعنى أن ارتفاع رتبة التوافقيات سيؤدي إلى انخفاض معاوقة المكثف ومن ثم يسحب تيار عاليا ويحترق. والمكثفات تعاني من ظاهرة كارثية أخرى مرتبطة بالتوافقيات وهي ظاهرة الرنين والتي سندرسها تفصيلا في الجزء التالي.

29.6 ظاهرة الرنين

من أخطر الظواهر المصاحبة لوجود التوافقيات ظهور ما يعرف بظاهرة الرنين Resonance . فوجود المكثفات في الشبكة أصبح شيئا معتادا سواء في طبيعة المعدات مثل الكابلات ، أو في كثير من الأجهزة التي شاع استخدامها في الشبكات مثل معوضات القدرة غير الفعالة SVC ، وقد يحدث انهيار لبعض مكونات الشبكة إذا تساوت المقاومة الحثية (Inductive reactance) الناتجة عن دوائر الحث في الشبكة مع المقاومة السعوية (Capacitive reactance) عند توافقيات معينة ، وبأسلوب آخر قد تحدث ظاهرة الرنين عند بعض الترددات تؤدي إلى زيادة الجهود في الشبكة. ويمكن أن تنشأ دائرة رنين بين مكثفات الخطوط والكابلات أو مكثفات تحسين معامل القدرة ، وبين ملفات الأحمال ، سواء كان ذلك ناتجا عن وجود هذه المكثفات والملفات في وضع توازي أو توالى معا.

29.6.1 خطورة ظاهرة الرنين

إذا تواجد في الشبكة تردد معين f_n يجعل $\omega L = 1/\omega C$ أى أن معاوقة الملف تساوى معاوقة المكثف كما في المعادلة ، فعندئذ يحدث الرنين وعنده يكون مجموع المعاوقتين يساوى صفرا لأن إشارة معاوقة المكثف عكس إشارة

معاوقة الملف ، وهذا يعنى أنه - فى عدم وجود مقاومة أومية - تكون معاوقة الدائرة الكلية = صفر ، وكأنه قد حدث لدينا Short circuit ($Z=0$) بدون وجود Short مادى فى الدائرة.

وتتراوح قيم الترددات التى يمكن أن تسبب رنين فى مكونات الشبكة بين 800 إلى 1000 هرتز حسب القيم النمطية لـ L_s and C_s (Inductance and capacitance of the source) ، وهذا يفسر عدم حدوث رنين فى الظروف العادية حيث التردد هو 50 هرتز وهو بالطبع بعيد عن التردد الرنينى.

ملحوظة: عند حدوث رنين يكون وجود أحمال عبارة عن مقاومات أومية شيئاً مرغوباً جداً لأنها الوحيدة التى لا تتأثر بالتردد ومن ثم تبقى مقاومتها هى المقاومة الوحيدة الباقية فى الدائرة وتقوم بعمل تحجيم limitation لقيم التيار المار أثناء حدوث الرنين.

ودوائر الرنين هذه نوعان : رنين توازى ورنين توالى .

29.6.2 رنين التوازى

يحدث عندما تكون المكثفات والملفات فى الدائرة موصلين على التوازى ، وقد يحدث هذا الرنين بين Self-capacitance وللخط X_{CS} وبين ملفات المعدات X_L ، أو يحدث بين الـ Self-capacitance وبين الـ Equivalent reactance, X_{LS} للشبكة والتى تتوقف قيمتها على قيمة الـ Short Circuit capacity, SCC للخط كما فى الشكل 14-30.

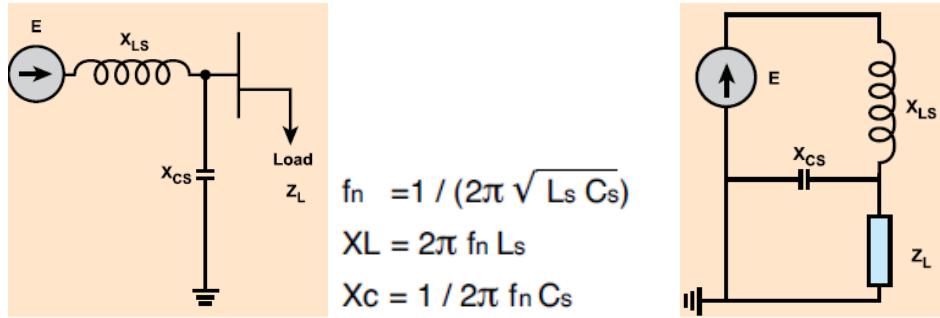


Figure 29-12

وهو النوع الأول ، ويحدث هذا الرنين أيضا عند بين مكثفات تحسين معامل القدرة وبين الـ Network inductance فى وجود أحمال غير خطية منتجة للتوافقيات كما فى الشكل 15-30 .

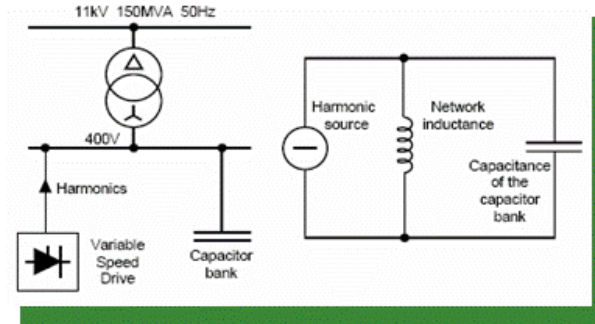


Figure 29-13

29.6.3 رنين التوالى

أما النوع الثانى من هذه الظاهرة فهو رنين التوالى ويحدث حين يكون لدينا مكتقات وملفات موصلة على التوالى كما فى الشكل 16-30 ، وعلى سبيل المثال عند توالى محول التوزيع مع مكثف تحسين معامل القدرة المركب على نفس الـ BB . والمشكلة تشبه تماما ما شرحناه فى النوع الأول.

ملحوظة هامة:

رنين التوالى يظهر على شكل زيادة كبيرة فى التيار بدون وجود أى Short ماضى بالدائرة ، بينما رنين التوالى يظهر على شكل زيادة كبيرة فى الجهد . وهذا هو خطورة ظاهرة الرنين.

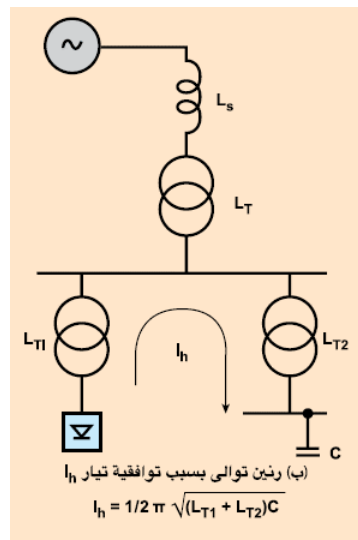


Figure 29-14

29.7 الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربائية:

تتص معظم المواصفات القياسية العالمية على الحدود المسموح بها للتوافقيات وذلك لحماية معدات ومكونات الشبكة الكهربائية من الآثار الناتجة عن وجود توافقيات التيار والجهد وتحدد هذه المعاملات كما فى الجزء التالى.

29.7.1 المواصفة القياسية رقم IEEE 519-1992

تعتبر هذه المواصفة أشهر المواصفات الخاصة بالتوافقيات وهذه المواصفة تضع حدودا قصوى للتوافقيات المسموح بظهورها فى إشارات الجهد والتيار عند نقطة اتصال الجهاز بالشبكة Point of Common Coupling PCC.

فالجداول رقم 1- و 2 و 3 فى الشكل التالى تعطى مستوى تشويه التوافقيات المنفردة كنسبة مئوية من أقصى تيار يسحبه الحمل وذلك فى خمس حالات مختلفة حسب نسبة الـ SCC/I_{Load} .

ونلاحظ أنه كلما كانت الشبكة قوية (SCC مرتفعة) كلما كانت النسب المسموح بتجاوزها أكبر وذلك كما قلنا سابقا أن ارتفاع قيمة القصر تعنى انخفاض قيمة المعاوقة وهذا يعنى انخفاض تأثير الجهود عند الـ BB المختلفة بمرور تيارات التوافقيات ومن ثم يمكن السماح بقيم أعلى نسبيا.

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
جدول رقم (١) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (١٢٠ ف - ٦٩ ك ف)						
Maximum Harmonic Current Distortion (in Percent of I_L)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .						
where I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						

جدول رقم (٢) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (٦٩ - ١٦١ ك ف)						
Maximum Harmonic Current Distortion (in Percent of I_L)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .						
where I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						

جدول رقم (٣) : حدود تشويه التيار التوافقي في الشبكات (< ١٦١ ك ف)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above. Current distortions that result in a dc offset, e.g., half - wave converters, are not allowed.						
* All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .						
where I_{sc} = maximum short - circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						

أما الجدول 4 فيعطى النسب المسموح بها في إشارة الجهد وذلك :

للتوافقية الواحدة Individual Voltage Distortion أو لمجموع التوافقيات كلها Total Harmonic Distortion . مع العلم بأنه يسمح بتجاوز هذه القيم بنسبة 50% زيادة عند الفترات العابرة مثل بدء المحركات وبدء تشغيل المحولات.

جدول رقم (4) : حدود تشوهات الجهد		
Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 KV and below	3.0	5.0
69.001 KV through 161 KV	1.5	2.5
161.001 KV and above	1.0	1.5
NOTE : High - voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user		

ملحوظة:

المواصفة السابقة تهتم بالشبكة ككل ونقطة الربط مع المشتركين ، ولكن توجد مواصفات أخرى تهتم بالمكون نفسه ، بمعنى هل التوافقيات التي يصدرها هذا الحاسب الآلي مثلاً مسموح بها أم لا؟ دون النظر للشبكة ، مثل المواصفة IEC 61000-3-2 التي تهتم بمعظم الأجهزة المنزلية والتجارية التي يقل تيارها عن 16 أمبير . وهذه المواصفة الأخيرة لا تنظر إلى THD ولكن تنظر إلى individual harmonic distortion. وقد سبق شرح الفرق بينهما.

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current A
Odd harmonics	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

فمثلاً التوافقيه الثالثة لا تتعدى 2.3 أمبير وهكذا ينظر إلى كل order وليس THD.

29.8 الحلول المستخدمة لمنع ظهور التوافقيات

هناك طرق للتخلص من التوافقيات في الشبكة المغذية للمستهلك أو تقليل تأثيرها ، من أهمها :

- 5- تقوية الشبكة بزيادة مقطع الكابلات أو إضافة كابلات ، وهذا سيؤدي إلى عدم تغير قيمة إشارة الجهد في الـ BBS التي ستمر خلالها تيارات التوافقيات كما سبق شرحه.
- 6- خفض نسبة تحميل المحولات حتى لا تدخل في منطقة الـ non linearity في منحنى الـ magnetization .
- 7- إعادة توزيع الأحمال لتقليل نسب عدم الاتزان بشبكات التوزيع.
- 8- تقليل نسبة الأحمال غير الخطية بحيث لا تتجاوز 30% من قدرة كل محول ، مع تخفيض النسبة إلى 15% إذا كان هناك مكثفات مركبة لتحسين معامل القدرة.
- 9- تجنب حدوث الرنين ، ويمكن معرفة التردد الذي يحدث عنده رنين بين المكثفات المركبة وبين ملفات الشبكة من المعادلة التالية:

$$hr = \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVAR_c}}$$

حيث

hr = resonant frequency as a multiple of the fundamental frequency

kVA_{sc} = short circuit current as the point of study

$kVAR_c$ = capacitor rating at the system voltage

غير أن الأسلوب الأشهر هو وضع Filters بالقرب من الأحمال لمنع انتشار تأثيرها في الشبكة . وهناك أنواع عديدة لهذه الـ Filters منها :

- "Passive Harmonic Filters " .
- "Active Harmonic Filters " .
- "Compound Harmonic Filters" .

29.8.1 أولاً :- الـ "Passive Harmonic Filters " .

يوجد طريقتان لاستخدام هذا الـ "filters" وهما : التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي .

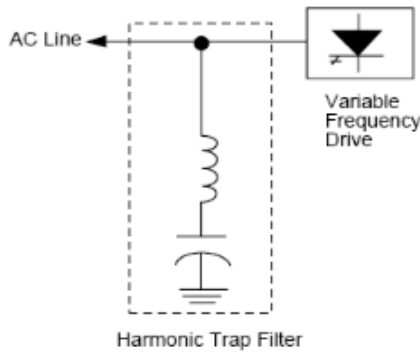


Figure 29-15

في حالة التوصيل هذا الفلتر على التوازي مع الحمل كما في الشكل 17-30 تكون فكرة تصميم الفلتر هي ضبط قيم الـ L وقيم الـ C الخاصة بالفلتر لتصبح معاوقتها صغيرة جدا بالنسبة لتردد توافقية معينة ومن ثم فعند مرور تيار هذه التوافقية فإنها ستفضل المرور بدائرة الفلتر عن المرور بالحمل ومن ثم نكون قد نجحنا في اصطياد هذه الـ "Harmonics". وغالبا يصمم هذا الفلتر لاصطياد الرتب الـ "5th , 7th".

وهذا النوع أثبتت النتائج قدرته على التخلص من التوافقيات الفردية خاصة الـ 3rd ، 5th و 7th و كلما زاد الـ order كلما عملت بكفاءة أعلى .

وهذه الفلتر مصممة لتحمل تيار التوافقية harmonic current فقط و أيضا تكون قادرة على نسبة من تيار الحمل تصل إلى 30% من قيمة تيار الأحمال إذا كانت تغذى مجموعة من الـ electric drives وهذا ما يميز هذا النوع عن الفلتر عن النوع الـ series ، مما يجعل حجمه صغيرا و غير مكلف .

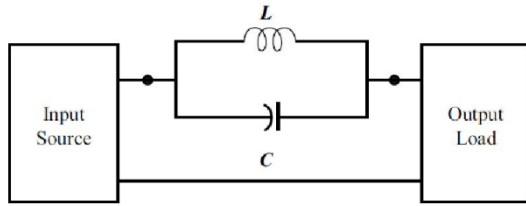


Figure 29-16

أما إذا تم تركيب الفلتر على التوالي مع الحمل ، فيكون الفلتر عبارة عن مكثفات و ملفات متصلين على التوازي و يكونوا على التوالي مع الأحمال كما في الشكل 18-30 ، وتكون فكرته هي اختيار قيم الـ L وقيم الـ C لتعطى معاوقة كبيرة لمرور تيار توافقية معينة بينما تكون قيمة هذه المعاوقة عادية أمام التيار الأصلي.

وغالبا يكون الاستخدام الأساسي لهذا النوع من الـ Filters ليس على التوالي مع الأحمال لأن ذلك سيؤثر على قيمة الجهد ، وإنما يكون استخدامها الأساسي في دوائر الـ Neutral لمنع مرور التوافقية الثالثة مثلا.

ويعيب هذا النوع من الـ Filters أنه يحتاج لمكثفات و ملفات ثقيلة في الحجم و مكلفة و تلك الـ Filters عند استخدامها تصبح جزء من الشبكة و من ثم فربما تؤثر على ظهور مشكلة الرنين.

29.8.2 ثانياً :- الـ "Active Harmonic Filters"

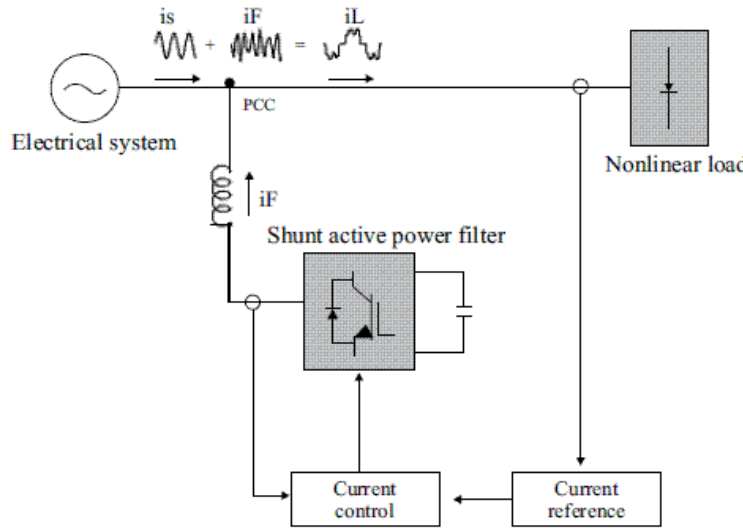


Figure 29-17

فكرة عمل هذا النوع (شكل 30-
(19) من الـ Filters أنه يقوم
بتوليد توافقيات مساوية للتوافقيات
التي يصدرها الحمل ولكن مضادة
لها في الاتجاه فتكون المحصلة
النهائية في الحالة المثالية (صفر
توافقيات) ، أو صغيرة جداً في
الحدود المسموح بها.

بمعنى آخر أنه يولد التوافقيات التي
يحتاجها الحمل ويمده بها ، ومن ثم
يخفف عبء مرورها في الشبكة
العامّة ، ويقوم بهذا الدور بدقة

وعند الأحمال المختلفة ، ومن ثم يكون مجموع الـ "Harmonic Wave" المولدة بالفلتر + والـ Pure
"sinusoidal wave" القادمة من مصدر التغذية = الـ "distorted current wave" التي تظهر داخل
الحمل فقط (ولا يظهر أثرها على الشبكة الخارجية) . ومن ثم يصبح الميزة الأساسية له هو توفير الأحجام الكبيرة
التي كانت تستخدم للملفات والمكثفات في النوع الأول.

29.8.3 ثالثاً : الـ "Compound Harmonic Filters"

نظراً لارتفاع سعر الـ "active harmonic filter" وأيضاً المشكلات التي توجد في الـ "passive filter" وأهمها
ارتفاع احتمالية حدوث ما يسمى بالـ "Resonance" بسبب وجود المكثفات والملفات داخل الدوائر بكثرة فقد تم
اللجوء إلى نوع جديد من الـ Filters وهو الذي يحتوي على كل من الـ "passive & Active filter" ويعرف
بالـ Compound أو الـ Hybrid .

ففي حالة الـ "5th, 7th harmonic order" يتعامل معها الـ "passive filter" أما في حالة الـ harmonic
"orders" الأخرى فيستخدم الـ "Active filter" ، وذلك بتنسيق معين "coordination" بين النوعين من الـ
Filters من أجل الحصول على أفضل أداء ينعكس على الـ "power Quality performance" .

29.9 المثال العملي الأول للحد من التوافقيات : Harmonic Cancellation

29.9.1 فكرة الـ Harmonic Cancellation

أحد الطرق المميزة والجديدة لتقليل تأثير التوافقيات في الشبكة هو جعل التوافقيات تلغى بعضها بعضا Harmonic Cancellation . وقد بنيت فكرة هذه الطريقة على أساس أن كل توافقية لها قيمة وزاوية Magnitude and Angle فإذا استطعنا أن نجمع التوافقيات بحيث يكون المجموع الاتجاهي يساوى صفرا (كما في حالة جمع الـ Balanced Three Phases) فإننا نكون بذلك قد منعنا ظهورها بدون استخدام الـ Filters وبدون القلق من ظاهرة الـ Resonance .

ويمكن تحقيق هذه الفكرة بثلاث طرق:

- 1- الأولى بمحاولة جمع الأجهزة المختلفة وذلك بعد دراسة التوافقيات الصادرة لكل جهاز مع بعض ، بحيث أنه حين تعمل هذه الأجهزة معا فإنها تلاشي التوافقيات (cancellation) أو تقللها (mitigation) كما هو ملاحظ في المثال العملي الأول الذي سنشرحه في الجزء التالي.
- 2- الثانية باستخدام محولات لها توصيلات مختلفة (مثلا D/Y & Y/Y) كما في المثال العملي الثاني.
- 3- الثالثة تكون باستخدام الـ Phase Shifting Transformer ، ففي المحولات العادية يكون دورها هو تغيير قيمة الـ Magnitude وذلك بتغيير قيمة الـ Turns Ratio ، أما هذا النوع من المحولات فإنه لا يغير الـ Magnitude بل يقتصر دوره على تغيير الـ Angle ، ومن ثم يمكن إلغاء (أو على الأقل تقليل قيمة) بعض التوافقيات بجمعها اتجاهيا معا .

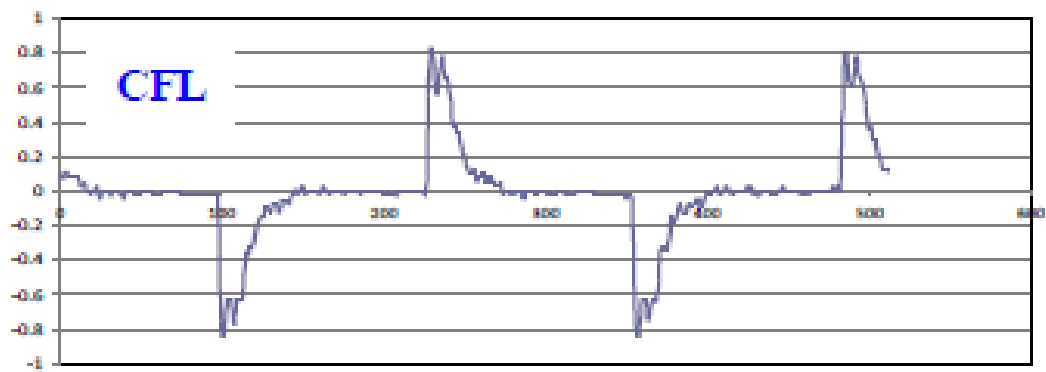
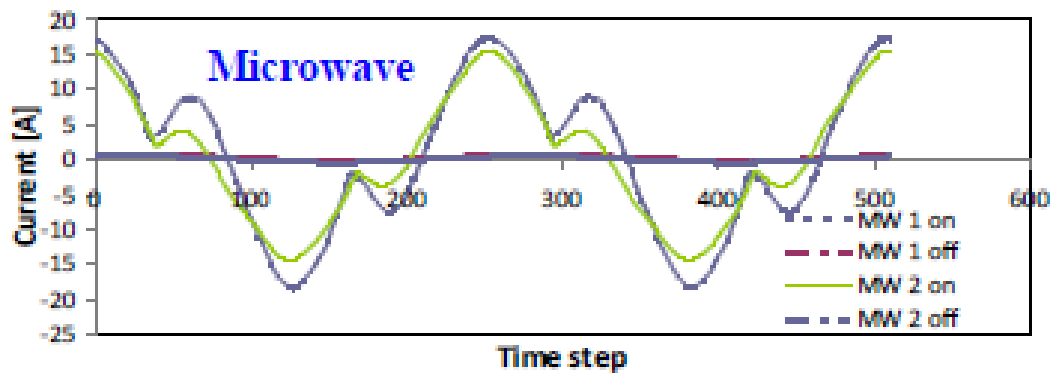
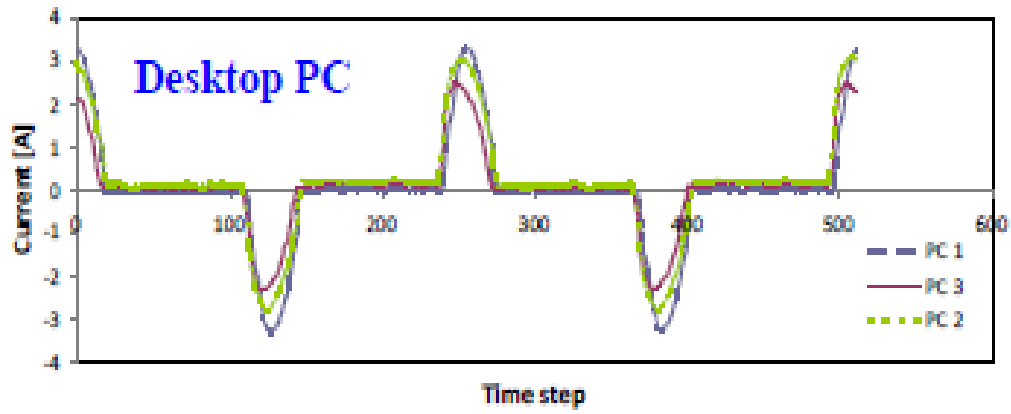
29.9.2 تطبيق الفكرة

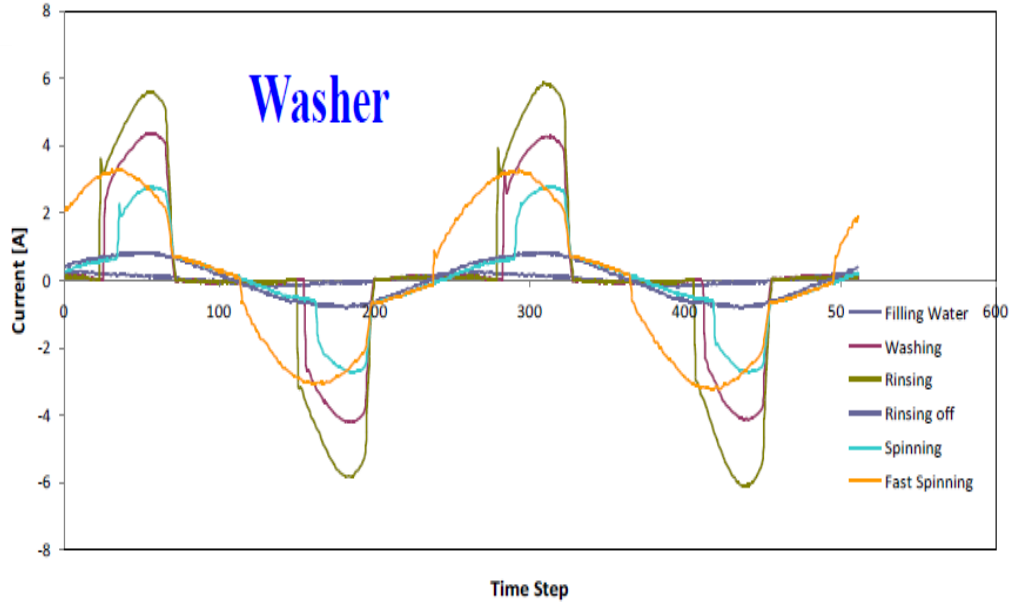
هذه الفكرة هي خلاصة رسالة ماجستير أشرفت عليها ، ويمكن تنفيذها في الأحمال الصغيرة كالأحمال المكتبية والمنزلية حيث يمكن التحكم في الأحمال بسهولة . والفكرة هي دراسة كل حمل على حدة وعمل مخطط للتوافقيات الخاصة به قيمة واتجاه ، ومحاولة جمع الأجهزة التي تختلف فيها التوافقيات اتجاهيا.

ففي هذا المثال تم عمل دراسة على مجموعة من الأجهزة وهي :

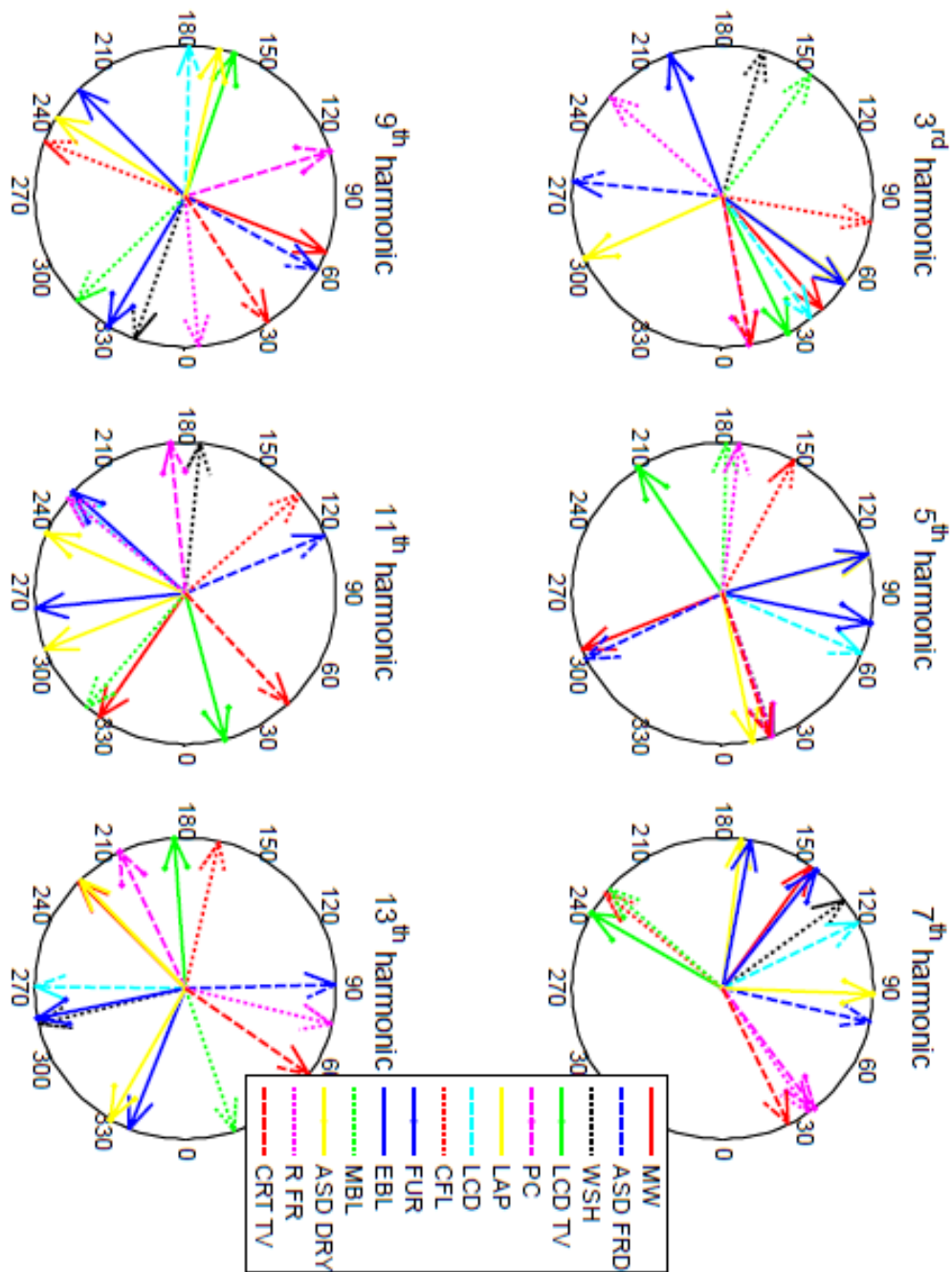
1. حاسب إلى
2. لمبة من نوع CFL
3. ميكروويف
4. غسالة ملابس

ووجد اختلاف في موجه التيار المشوهة كما هو ملاحظ في الشكل التالي :

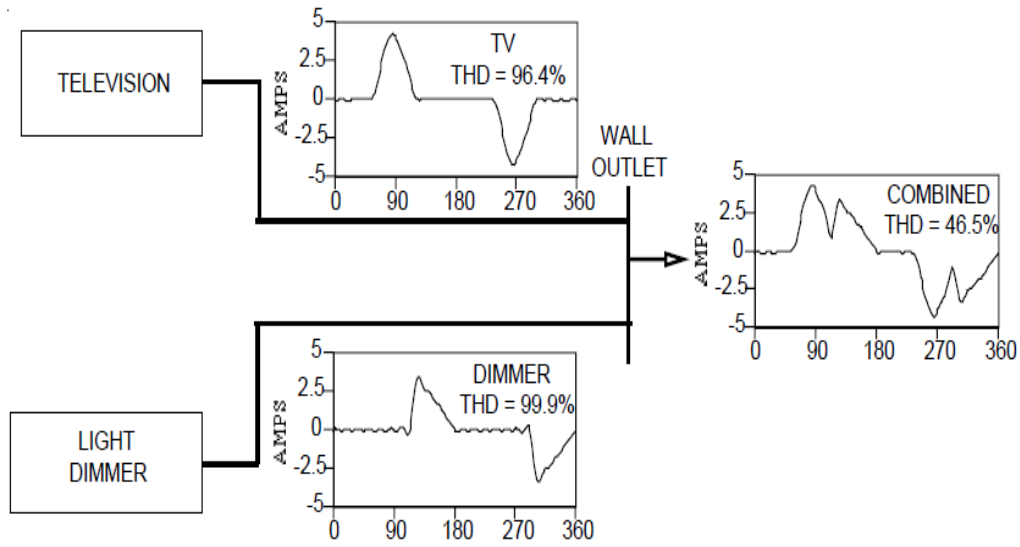




وبدراسة توافقيات هذه الأجهزة مع معظم الأجهزة المنزلية الأخرى ، ومع التركيز على التوافقيات التي لها قيمة واتجاه وليس قيمة فقط ، لوحظ وجود اختلاف بين كل الأجهزة في القيمة والزاوية للتوافقيات كما هو ملاحظ من الشكل التالي :



يلاحظ هنا اختلاف كل جهاز عن الآخر في زاوية التوافقية مما يفسر ظاهرة التلاشي cancellation ولملاحظة التأثير الدقيق على التوافقيات قيمة واتجاه فقد تم عمل دراسة على جهاز تلفزيون من النوع LED و متحكم في الإنارة light dimmer ودراسة كل جهاز في حالة عمله منفصلا وفي حالة دمجهم. وتم ملاحظة التالي :



Harmonic	Television		Light Dimmer		Combined	
	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle	Magnitude*	Phase Angle
1	100.0 (1.20A)	1	100.0 (0.88A)	-50	100.0 (1.88A)	-20.3
3	79.8	-173	76.6	31	23.3	148
5	49.2	12	42.3	122	30.9	49
7	20.5	-159	21.1	-111	21.0	-138
9	4.0	81	21.2	20	11.4	31.3
11	5.5	-13	17.7	128	6.0	106
13	3.1	175	12.2	-108	6.2	-121
15	0.8	-138	11.7	20	5.0	17

أي عند دمج الأجهزة معا تقل التوافقيات نتيجة اختلاف زاوية التوافقيات ، لذا يفضل أن يتم تعريف التوافقيات بقيمة واتجاه وليس قيمة فقط.

29.10 المثال العملي الثانى للحد من التوافقيات

فى المنظومات الصناعية ومع تزايد الاعتماد على variable speed drives وأشباهاها من الأجهزة المنتجة للتوافقيات بكل رتبها أصبح التعامل مع هذه المشكلة ضرورياً وأصبح أخذ قياسات دورية للتأكد من جودة القدرة شيئاً أساسياً.

29.10.1 وصف المشكلة

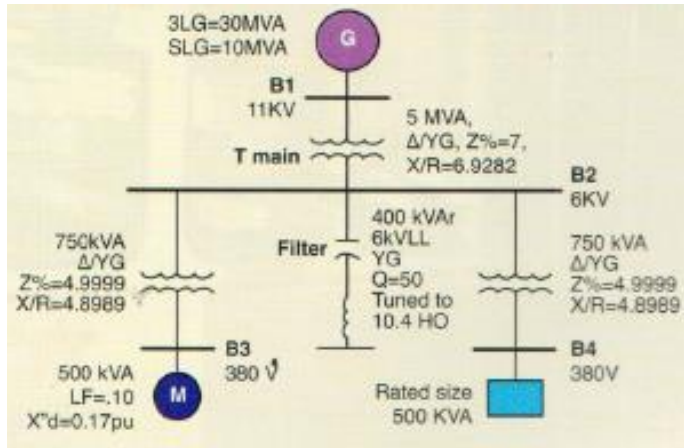


Figure 29-18

فى هذا الجزء نقدم نموذجاً لإحدى هذه الدراسات والتي تظهر فى الشكل 30- حيث لدينا محولين قدرة كل منهما 750 kVA يتغذيان من B2 BB المتصل بمحول رئيسي قدرة 5 MVA مع وجود مكثفات لتحسين معامل القدرة.

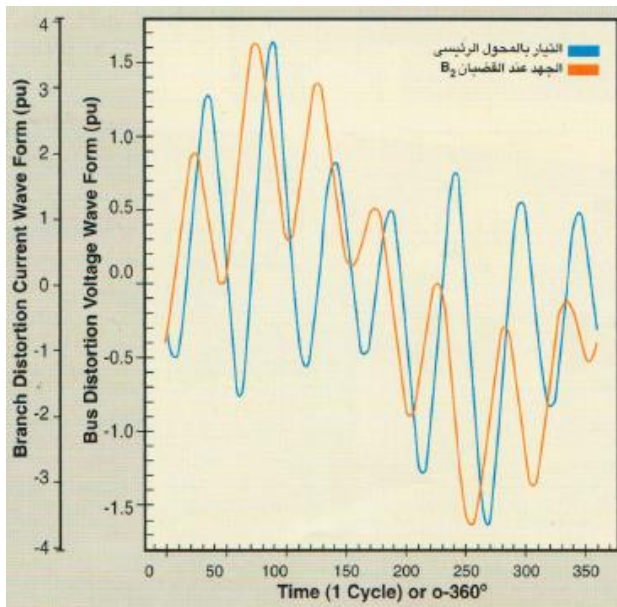


Figure 29-19

والأحمال المغذاة من المحولين الصغيرين تحتويان على أجهزة Six Pulses Inverters وهذا يعنى أن التوافقيات من الرتب 5 و 7 و 11 موجودة بالموجات . وقد ثبت ذلك من تحليل موجات الجهد التي تظهر على B2-BB والتي تظهر حجم التشوه فيها وكذلك فى التيار المار بالمحول الرئيسى فى الشكل 30-21 .

وباستخدام أجهزة تحليل القدرة Power Analyzer نحصل على قيم توافقيات الجهد والتيار ونسب التشوه لكل واحدة من هذه التوافقيات .

ومن الجدولين التاليين يتبين حجم التشوه الكبير لاسيما بالتوافقيات الـ 5 و 7 و 11 وهى التوافقيات التي تجاوزت نسبة الـ 3% المسموح بها المواصفات.

جدول رقم (١): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2				
رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-		
٥	١٠٤٥,٠٣١	٧٦,٢٢	١٧,٦٤١	٣,٠٠٠ <
٧	٣٣٢٩,٩٣٨	٦٩,٣٥-	٥٦,٢١٢	٣,٠٠٠ <
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	٣,٠٠٠ <
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٣٢,٨٧٦	٢٤,٥٦	٠,٥٥٥	٣,٠٠٠
١٩	١٦,٠٤٦	١٤٩,٩١	٠,٢٧١	٣,٠٠٠
الجهد: ٦ ك ف - V_{rms} : ٦٨٧٨,٢٥ ف				
التشوه الكلي للجهد (THD%): ٥٩ < - حد المواصفات القياسية: ٥%				

جدول رقم (٢): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي				
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥		
٥	٣٨,٧٩٩	١٢,٧٦-	٨٣,٤٧٩	٧,٠٠٠ <
٧	٨٨,٣١٤	١٥٨,٦١-	١٩٠,٠١٧	٧,٠٠٠ <
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	٣,٠٠٠ <
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٣٥٩	٦٥,١٥-	٠,٧٧٣	٢,٠٠٠
١٩	٠,١٥٧	٦٠,١٧	٠,٣٣٧	٢,٠٠٠
الجهد: ١١ ك ف - التيار I_{rms} : ١٠٧,١٢ أ - المعامل K: ٣٦,٨٨				
التشوه الكلي للتيار (THD%): ٢٠٧,٦٦ < - حد المواصفات القياسية: ٨%				

29.10.2 آليات الحل

وفي هذا المشروع تم تجربة تقليل أو حذف هذه التوافقيات عن طريقة محاولة جمع التوافقيات الصادرة من

المحول الأول والثاني اتجاها ولكن بعد تغيير

توصيلة أحد المحولين لتصبح Y/Y مؤرضة بدلا

من Δ/Y مؤرضة ، والفكرة من وراء ذلك أن

المحولين كانا متماثلين في كل شيء وهذا يجعل

التوافقيات المارة خلالها يتم جمعها جبريا للتمائل

في القيمة والاتجاه ، فإذا تم تغيير توصيلة أحد

المحولات فسينتج phase shift قدره 30 درجة ،

كما في الشكل 30-22. قارن هذا الشكل بالشكل

السابق لترى كيف ساعد الـ phase shift في

حدوث نوع من الـ Cancellation للتوافقيات .

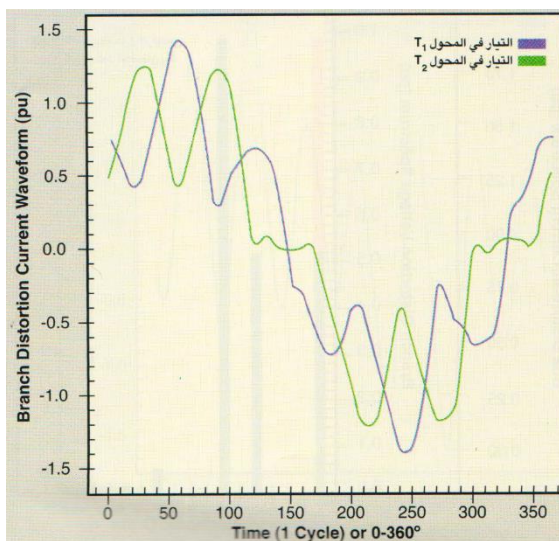


Figure 290-29-20

جدول رقم (٣): طيف توافقيات الجهد على القضبان B2				
رتبة التوافقيات	جهد التوافقيات (ف)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٥٩٢٣,٩٢٤	٢,٣٠-	٠,٠٠	٣,٠٠٠
٥	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١١	١٧٩,٢٥٥	١٦٦,٨٣	٣,٠٢٦	٣,٠٠٠ <
١٣	٥٨,٤٩٤	٥٤,٠٥-	٠,٩٨٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠٠	٣,٠٠٠
الجهد: ٦ ك ف - $V_{rms} : ٥٩٢٦,٩٢$ ف التشوه الكلي للجهد (THD%) : ٣,١٨ - حد المواصفات القياسية: ٥%				

جدول رقم (٤): طيف توافقيات التيار في المحول الرئيسي				
رتبة التوافقيات	تيار التوافقيات (أمبير)	زاوية وجه التوافقيات (درجة)	التشوه (%)	حدود المواصفات القياسية
١	٤٦,٤٧٧	١٣,٦٥	٠,٠٠٣	٧,٠٠٠
٥	٠,٠٠١	٧٧,٢٥	٠,٠٠٣	٧,٠٠٠
٧	٠,٠٠٣	١١١,٣٨	٠,٠٠٧	٧,٠٠٠
١١	٣,٠٢٥	١٠٢,٧٠-	٦,٥١٠	٣,٠٠٠ <
١٣	٠,٨٣٥	٣٦,٣٥	١,٧٩٧	٣,٠٠٠
١٧	٠,٠٠٠	٢٤,٨٧	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠
١٩	٠,٠٠٠	٢٩,٨٣-	٠,٠٠٠	٢,٠٠٠
الجهد: ١١ ك ف - التيار $I_{rms} : ٤٦,٥٨$ أ - المعامل $K : ١,٥٦$ التشوه الكلي للتيار (THD%) : ٦,٧٥ - حد المواصفات القياسية: ٨%				

والنتيجة واضحة أكثر بعد إجراء

دراسات جديدة بالـ Power

Analyzer والتي تظهر نتائجها

في الجدولين التاليين.

وواضح منهما أن نسب التشوه قد

انخفضت بدرجة كبيرة اللهم سوى

التوافقية رقم 11 التي لم تنزل

أعلى من المسموح لاسيما في

التيار. وإن كان من الممكن

التخلص من هذا التجاوز البسيط

بواسطة فلتر غير مكلف.

تجدر الإشارة إلى أن هذا الحل قد

ساعد في تحسين جودة القدرة

على BB B2 ، ولكن مازال كل

من المحولين على حدة يعاني من

تأثير التوافقيات داخلهما ،

وبالتالي تقل كفاءة كل منهما ويمكن أن يتعرضا لمشاكل.

والشكل 23-30 يقارن بين شكل موجات الجهد والتيار الأصليين مقارنة بالشكل بعد مجرد تعديل توصيلة أحد

المحولات كما رأينا وأخيرا الشكل بعد استخدام فلتر للتخلص من التوافقية الـ 11 .

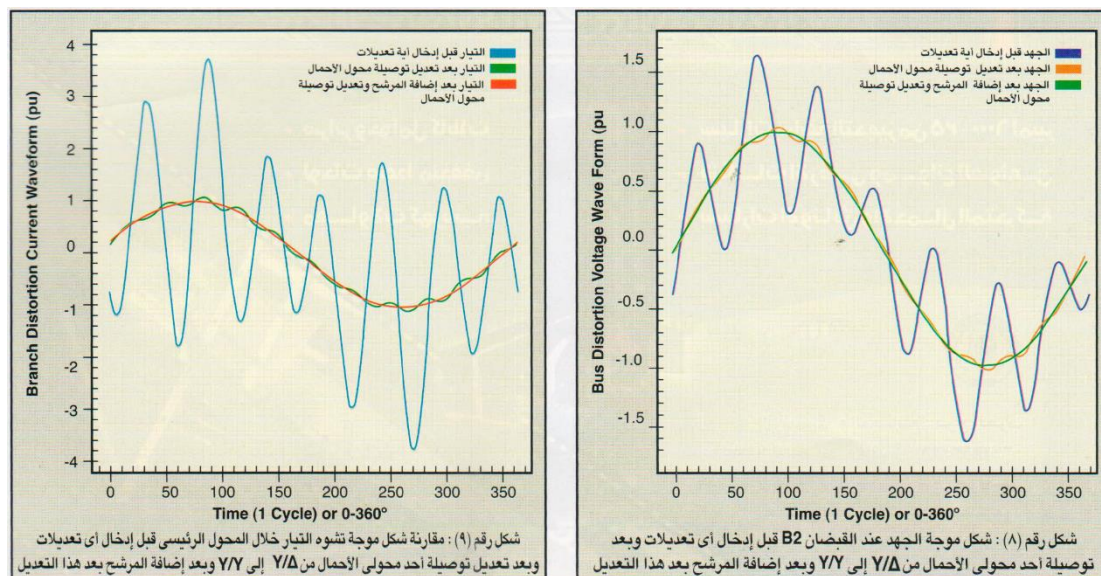


Figure 290-29-21

ملحق

قاموس لبعض المصطلحات التي يكثر استخدامها

2	Absolute Temperature	درجة الحرارة المطلقة
3	Admittance, Y	المساهلة وهي عكس المعاوقة Z
4	Arcing Ground	القوس الكهربى الأرضى
5	Arrestor	مانعة صواعق
6	Automatic Voltage Regulator	منظم جهد أتوماتيكي
7	Base Load	الحد الدائم للحمل
8	Blackout	الإفلام التام
9	black start	بدء تشغيل المحطات بعد وقوع إفلام تام
10	Boiler	غلاية
11	Brushes	فرش كربونية
12	Bundle Conductors	موصلات متعددة (حزمية)
13	Capacitance	سعة المكثف
14	Capacitive Reactance	معاوقة المكثف
15	Chimney	المدخنة
16	Circulating current	تيار فى دائرة مغلقة
17	Combined cycle	دورة مركبة
18	common service building	مبنى الخدمات العامة
19	COMMUNICATION	الاتصالات
20	compressor	الضاغط
21	Condenser	المكثف
22	Dampers	مهدئ السرعة
23	Demand Management	ادارة الأحمال
24	Digital Protection	الوقاية الرقمية
25	Disc	قرص
26	Distance relay	وقاية مسافية
27	Dry Transformer	محول جاف (غير زيتي)
28	Economizer	الموفر (فى المحطات الحرارية)

29	Electric Field	المجال الكهربى
30	Excitation	الاستثارة (بدء توليد المجال المغناطيسى)
31	Exciter	الجهاز المسئول عن توليد المجال المغناطيسى بالمولد
32	Field Current	تيار المجال
33	Fire fighting pump	مضخة إطفاء الحريق
34	Flashover	شرارة كسر العزل
35	Flux Linkage	الفيض المرتبط
36	Frequency	التردد
37	Generator	المولد
38	Governor	المتحكم فى البخار (المحطات البخارية)
39	Governor Valve	صمام المتحكم
40	Guard Rings	حلقات حماية (فى عوازل الأبراج)
41	Healthy Phases	الأوجه السليمة من الأعطال
42	Heat Recovery Steam Generator, HRSG	منظومة الاستفادة من الحرارة فى توليد البخار فى محطات الدورة المركبة
43	Impedance	المعاوقة
44	in operation	مولد يدور بدون توصيل أحمال عليه
45	in service	مولد يدور ومتصل فعلا بأحمال عليه
46	Inductance	القيمة الحثية
47	Inductive reactance	المعاوقة الحثية
48	Infinite Bus Bar	قضبان توزيع لانتهائية القدرة
49	inverters	مغير للجهد من مستمر إلى متردد
50	Load Curve	منحى الأحمال
51	Load Demand	مستوى الطلب للأحمال
52	Load Factor	معامل نسبة تشغيل الأحمال
53	Load sharing	التشارك فى تغذية الأحمال
54	Load Shedding	فصل الأحمال
55	Max Demand	الحمل الأقصى
56	Mechanical Torque	العزم الميكانيكى
57	off load tap changer	مغير للجهد أثناء توقف المحول
58	Open Circuit	دائرة مفتوحة
59	Parameters	معاملات
60	Partial Discharge	تفريغ جزئى
61	Peak Load	الحمل الأقصى
62	phase sequence	تتابع الأوجه

63	phase shift	زحزحة الأوجه
64	Phases	الأوجه
65	Power	القدرة
66	Power Angle	زاوية القدرة
67	power factor	معامل القدرة
68	Power Loss	الفقد في القدرة
69	Reactive Power	القدرة غير الفعالة
70	Reactor	المفاعل (النوى)
71	Receiving End	جهة الأحمال
72	Rectifiers	موحد الجهد من متردد إلى مستمر
73	Reheater	إعادة التسخين
74	Resistive Loads	حمل مقاومات خطية
75	reverse power relay	جهاز وقاية لاكتشاف انعكاس اتجاه سريان القدرة
76	Rotor	العضو الدوار في الآلات الكهربائية
77	Series Capacitors	مكثفات توصل على التوالي
	Short Circuit	القصر
78	Shunt Capacitors	مكثفات توصل على التوازي
79	Shunt reactors	ملفات توصل على التوازي
80	Single Line Diagram	مخطط رسم الدوائر الكهربائية في المحطات
81	skin effect	مرور التيار على أطراف الموصل (القشرة الخارجية)
82	Spacer	فواصل توصيل الموصلات (خطوط هوائية)
83	spark gap	حلقات تسمح بتفريغ شرارة كهربية لحماية معدة معينة
84	spinning reserve	الرصيد المتاح من القدرة
85	stability	الاستقرار
86	Stability limit	حد الاستقرار
	Stability Margin	مدى الاستقرار
87	Starting Motor	موتور لبدء التشغيل
88	Stator	العضو الثابت في الآلات الكهربائية
89	steam valve	صمام البخار
90	String	سلسلة العوازل (في الأبراج)
91	Synchronized	التزامن
92	synchronous speed	سرعة دوران المولد التزامنى
93	Tariff	تعريف أسعار الطاقة
94	thermal limit	الحد الحرارى
95	Tidal	المد والجزر

96	Transients	الهزات العابرة
97	Travelling Waves	الموجات الزاحفة
98	turbine shaft	عمود دوران التربينه
	Tutorial	مذكرة علمية مرجعية
99	Vents	فتحات تنقيس
100	Voltage drop	هبوط فى الجهد
101	Voltage Gradient	تدرج الجهد
102		
103		
104		

قائمة المراجع

أهم المراجع العربية

- 1- كتب المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب - السعودية
- 2- كتب الأستاذ الدكتور عبد المنعم موسى
- 3- كتب الأستاذ الدكتور أسر زكى
- 4- كتاب الأستاذ الدكتور منير محمد مجاهد، مصادر الطاقة في مصر
- 5- مجلة الكهرباء العربية
- 6- ملفات شركة مصر الوسطى لتوزيع الكهرباء - مركز تدريب الكوادر البشرية
- 7- محاضرات مركز تطوير الدراسات العليا والبحوث فى العلوم الهندسية
- 8- ملف عن اختبارات الكابلات للمهندس كامل بدرخان
- 9- ملف وسائل نقل القدرة ومحطات التوزيع للمهندس يسرى عبد السلام
- 10- تقارير ميدانية لطلاب السنة الرابعة بهندسة القاهرة (دفعة 2016)
- 11- التقارير السنوية لوزارة الكهرباء والطاقة.
- 12- كتب الأستاذ الدكتور محمود جيلانى.

أهم المراجع الأجنبية

- 1- Electric Power Substation Engineering, 2nd Edition, Edited by John D. McDonald, CRC press, 2007.
- 2- IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, 1993
- 3- Power Plant Engineering, A.K.Raja, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006.
- 4- Principles of Power Systems, V.K. Mehta
- 5- Elements of Power System Analysis, William Stevenson, McGraw-Hill Publishing, 4th edition
- 6- Electrical Technology, B. L. Theraja, 2005
- 7- SUBSTATION GROUNDING, Inna Baleva, MASTER OF SCIENCE, 2012
- 8- IEEE Definition and Classification of Power System Stability, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004
- 9- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
- 10- Power quality / C. Sankaran, CRC Press, 2002.
- 11- ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS For the Nonelectrical Professional, Steven W. Blume, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2007
- 12- Electrical Machines, Drives and Power Systems, T. Wildi, 6th edition, 2008.
- 13- Electrical energy conversion and transport : an interactive computer-based approach /George G. Karady, Keith E. Holbert. , IEEE press, Second edition, 2013.
- 14- HV Substation Design: Applications and Considerations, Dominik Pieniazek, P.E. Mike Furnish, P.E. IEEE CED, 2015

تم بحمد الله